

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Testování trvanlivosti řezných nástrojů pro obrábění
grafitu

Durability Testing of Cutting Tools for Machining of
Graphite

Student:

Bc. Michal Sněhota

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.

Ostrava 2017

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Sněhota**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Specializace: 20 Strojírenská technologie
Téma: **Testování trvanlivosti řezných nástrojů pro obrábění grafitu**
Durability Testing of Cutting Tools for Machining of Graphite
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Režerše stávajícího stavu obrábění grafitu.
2. Návrh experimentální činnosti obrábění.
3. Provedení experimentálního testování vhodných nástrojů.
4. Vyhodnocení naměřených dat.
5. Technicko-ekonomické zhodnocení výsledků testování.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; SADÍLEK, M.; PETŘKOVSKÁ, L.; NOVÁKOVÁ, J. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. Dostupné na <http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/NSPO>. ISBN 978-80-248-1505-3.
- [2] HUMÁR, A. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [3] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.
- [4] STEPHENSON, D. A.; AGAPIOU, J. S. *Metal cutting theory and practice*. New York : Marcel Dekker, Inc., 1997. ISBN 0-8247-9579-2.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.**


Datum zadání: 09.12.2016

Datum odevzdání: 15.05.2017



doc. Ing.et Ing.Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry





doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 10. 5. 2017

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 ods. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 10. 5. 2017

.....
podpis studenta

Bc. Michal Sněhota
Osmilány 10/16
747 27 Koberice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SNĚHOTA, Michal. *Testování trvanlivosti řezných nástrojů pro obrábění grafitu*. Ostrava: Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2017, 49 s. Diplomová práce, vedoucí práce: Petrů, Jana.

Tato práce se zabývá testováním trvanlivosti břitu čtyř typů vyměnitelných břitových destiček pro obrábění grafitu. Průběh testu bude probíhat v souladu s normou ISO 3685. Cílem práce je zjištění, která z uvedených vyměnitelných břitových destiček má lepší vlastnosti a složení ochranné povlakové vrstvy a tím i větší trvanlivost.

ANOTATION OF THESIS

Sněhota, Michal. *Durability Testing of Cutting Tools for Machining of Graphite*. Ostrava: Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2017, 49 p. Diploma thesis, head: Petrů, Jana.

This thesis deals with testing of the cutting edge life of four types of the Replaceable cutting inserts for graphite machining. The course of the test will be in accordance with ISO 3685. The aim of the work is to find out which of the Replaceable cutting inserts have better properties and composition of the protective coating layer and hence longer durability.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	7
Úvod	9
1 Charakteristika Grafitu	10
1.1 Vlastnosti grafitu.....	10
1.2 Výroba grafitu.....	11
1.3 Výroba syntetického grafitu.....	13
1.4 Využití syntetického grafitu.....	15
1.5 Formy uhlíku a jejich využití.....	17
2 Obrábění grafitu	19
2.1 Grafit R8650	21
2.2 Příprava grafitových polotovarů	22
2.3 Frézování tvarových elektrod z grafitu	24
2.4 Frézovací nástroje pro obrábění tvarových elektrod z grafitu	27
2.5 Moderní směry v obrábění grafitu	29
3 Elektrojiskrové hloubení.....	30
3.1 Princip elektrojiskrového hloubení.....	31
3.2 Elektrojiskrové hloubičky	34
3.3 Programování elektrojiskrové hloubičky	35
3.4 Požadavky na dielektrikum.....	37
3.5 Materiál nástrojových elektrod	37
4 Testování trvanlivosti VBD	38
4.1 Trvanlivost a životnost nástroje.....	38
4.2 Současný stav testování trvanlivosti nástrojů při obrábění grafitových materiálů.....	41
4.3 Testování trvanlivosti VBD pro frézování grafitu	44
4.4 Průběh testu.....	45
4.5 Celkové vyhodnocení testu	50
Závěr	52
Seznam použité literatury	54

Seznam použitých značek a symbolů

$A\alpha$	-	Plocha hřbetu	[-]
$A\gamma$	-	Plocha čela	[-]
BDD	-	Boron Doped Diamond	[-]
CNC	-	Computerized Numerical Control	[-]
CAM	-	Computer Aided Manufacturing	[-]
CVD	-	Chemical Vapour Deposition	[-]
DLC	-	Diamond – like Carbon	[-]
FESEM	-	Field emission scanning elektron microscopy	[-]
HFCVD	-	Hot Filament Chemical Vapour Deposition	[-]
KB	-	Šířka žlábků - vzdálenost vzdálenější hrany žlábků od ostří	[mm]
KVy	-	Radiální opotřebení špičky	[mm]
MCD	-	Microcrystalline Diamond	[-]
PCD	-	Polycrystalline Diamond	[-]
Ra	-	Průměrná aritmetická odchylka posuzovaného profilu	[μm]
T	-	Aritmetický průměr hodnot T_i	[min]
T_i	-	Jednotlivé trvanlivosti	[min]
VB	-	Opotřebení hřbetu	[mm]
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure	[-]
a_e	-	Radiální šířka řezu	[mm]
a_p	-	Axiální hloubka řezu	[mm]
c_T	-	konstanta (10^9 - 10^{13})	[-]
c_v	-	konstanta (10^2 - 10^3)	[-]
c_{vT}	-	konstanta	[-]
d	-	Průměr stopky nástroje	[mm]
d_1	-	Průměr břitu nástroje	[mm]
d_2	-	Průměr dříku nástroje	[mm]
f_z	-	Posuv na zub	[mm]
l	-	Celková délka nástroje	[mm]
l_1	-	Délka břitu nástroje	[mm]
l_2	-	Délka řezné části nástroje	[mm]
m	-	Exponent (míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti)	[-]
q	-	Počet použitelných ostří destičky	[mm]
v_c	-	Řezná rychlost	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]
v_{cT}	-	Řezná rychlost při konstantní trvanlivosti	[$\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$]

x	-	Počet možných broušení nástroje	[-]
x_v	-	Exponent vyjadřující vliv hloubky řezu	[-]
y_v	-	Exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku	[-]
κ_r	-	Nástrojový úhel nastavení hlavního ostří	[°]
γ_f	-	Nástrojový úhel čela v rovině boční	[°]
γ_p	-	Nástrojový úhel čela v rovině zadní	[°]

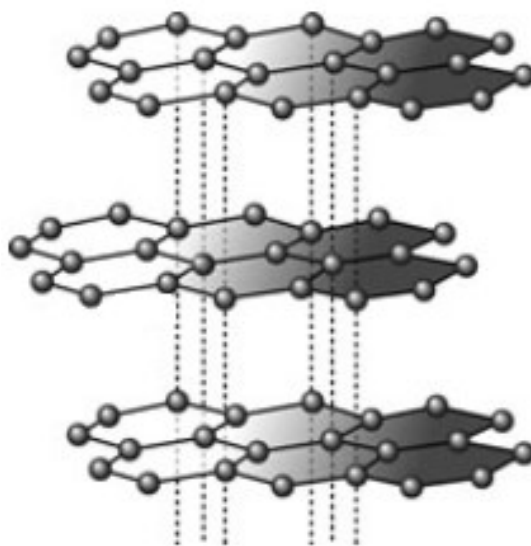
Úvod

Tato práce se bude zabývat testováním trvanlivosti břitu u čtyř typů vyměnitelných břitových destiček pro obrábění grafitu, které se od sebe liší ochrannou povlakovou vrstvou. Průběh testu bude probíhat v souladu s normou ISO 3685, kdy zvolením vhodného kritéria opotřebení a kontrolních časových úseků budou zjištěné hodnoty zaznamenávány do příslušných tabulek a grafů. Výsledkem této práce bude informace, která z uvedených vyměnitelných břitových destiček má lepší vlastnosti a složení ochranné povlakové vrstvy a tím i delší trvanlivost.

Na začátku této práce budou rozebrána témata o grafitu, jeho vlastnostech, použití a obrábění. V další části bude vysvětlen pojem elektroerozivního obrábění a to především elektrojiskrového hloubení (základní definice, stroje, nástrojové elektrody, aj.). Po této kapitole následuje samotná podstata práce a to testování trvanlivosti řezných nástrojů pro obrábění grafitu. V úvodu této kapitoly budou uvedeny definice a potřebné výpočetní vzorce. Dále bude práce obsahovat postřehy a informace ze zahraničních zdrojů, které se zabývaly podobnou problematikou. Poté se práce bude zabývat vlastním průběhem a vyhodnocováním testu.

1 Charakteristika Grafitu

Grafit je prvkem, který je za běžných podmínek stabilní formou uhlíku a skládá se z vrstev hexagonálně uspořádaných atomů. V tomto uspořádání je vzdálenost mezi jednotlivými atomy 0,142 nm a jejich soudržnost udržuje kovalentní vazba. Jednotlivé vrstvy jsou vázány Van der Waalsovými vazbami. Takového uspořádání propůjčuje grafitu dobré mechanické vlastnosti a také elektrickou a tepelnou vodivost.



Obr. 1.1 Grafit [4]

1.1 Vlastnosti grafitu

Mezi základní nejdůležitější vlastnosti grafitu patří hustota, mechanické, elektrické, chemické a tepelné vlastnosti.

a) **Hustota** - dokonalý monokrystal grafitu má hustotu $2,269 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Hustota synteticky vyrobeného grafitu se pohybuje v rozmezí $1,6 - 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Hustotě dokonalého monokrystalu se blíží vysoce orientovaný pyrolytický grafit, který vzniká chemickou depozicí uhlovodíků z plynné fáze za vyšších teplot ($1700 \text{ }^{\circ}\text{C} - 2300 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

b) **Mechanické vlastnosti** – pevnost v ohybu, modul pružnosti a tvrdost se liší od směru působícího zatížení. Pokud zatížení působí ve směru kolmém na roviny grafitických vrstev, jsou velmi nízké. Pokud zatížení působí ve směru rovnoběžném, pak jsou velmi vysoké.

c) **Tepelná vodivost** – je stejně jako v předchozím případě směrově závislá. Ve směru rovnoběžném s grafitickými vrstvami lze grafit považovat za velmi dobrý tepelný vodič. Naopak ve směru kolmém se jeví jako izolant. Tato vlastnost se projevuje i v tepelné roztažnosti a při konstrukci součástí je potřeba mít tuto skutečnost na paměti. [1]

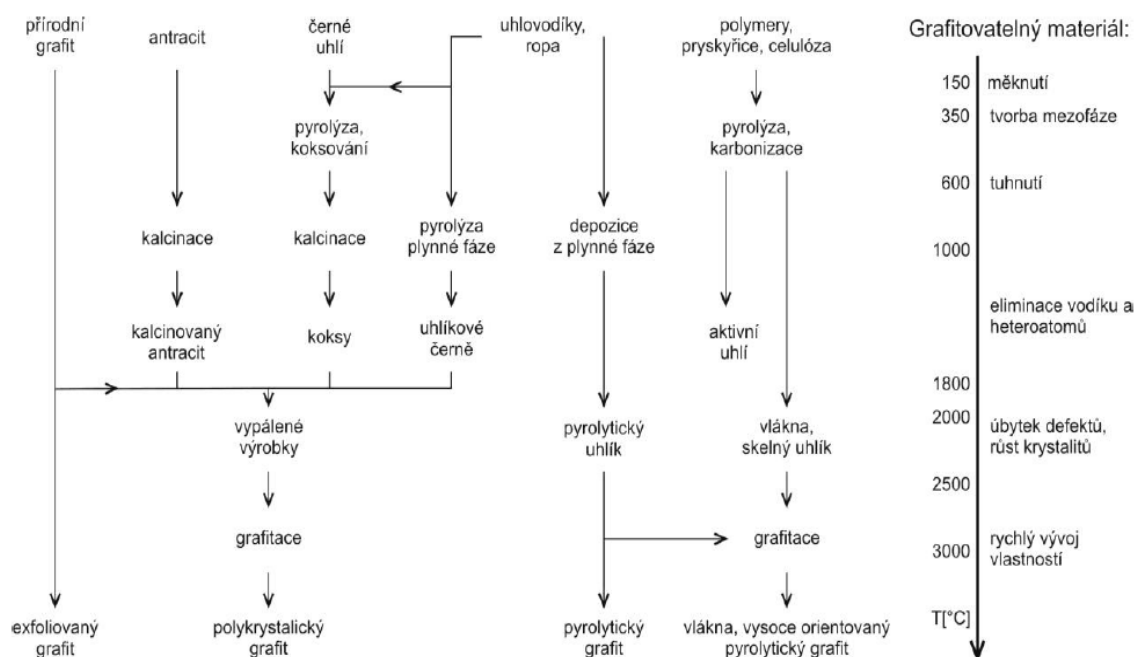
d) **Elektrické vlastnosti** – vodivost je ve směru grafitických rovin srovnatelná s vodivostí kovů, což je způsobeno snadným pohybem elektronů. Ve směru kolmém na grafitické roviny se grafit chová jako izolant.

e) **Chemická stabilita** – grafit má vysokou chemickou odolnost a za běžných teplot je takřka inertní. Reaguje převážně v kyselých, či velmi oxidujících prostředí. Za vyšších teplot tvoří karbidy s prvky brómu, křemíku, molybdenu a dalšími. Čím více se však struktura grafitu podobá struktuře dokonalého grafitu, tím je jeho reaktivita nižší.

1.2 Výroba grafitu

Převážná část, s výjimkou přírodního grafitu, se vyrábí pyrolýzou. Pyrolýza je termální rozklad organických sloučenin, kterými jsou uhlí, ropa, smoly, polymery a uhlovodíky za současného zabránění přístupu chemických činitelů, jako kyslíku, vzduchu, či jiných zplyňovacích látek.

Na obrázku níže (Obr. 1.2) je schéma popisující vztah mezi výchozími surovinami, tepelným zpracováním a výsledným produktem. [1]



Obr. 1.2 Schéma výroby grafitu [1]

Pyrolýza může probíhat způsoby:

a) Nízkoteplotní proces ($200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) – Vyznačuje se postupným zvyšováním teploty. Probíhá-li v kondenzovaném stavu, výsledkem je koks a nebo karbonizát (uhlí, dehet). Pokud během procesu dochází k měknutí a zkapalnění materiálu jedná se o proces koksování. V poslední fázi, je potřeba odstranit zbytkové heteroatomy (např. vodík), tento proces probíhá v rozmezí teplot $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$. U koksování se tento proces zařazuje jako závěrečná operace.

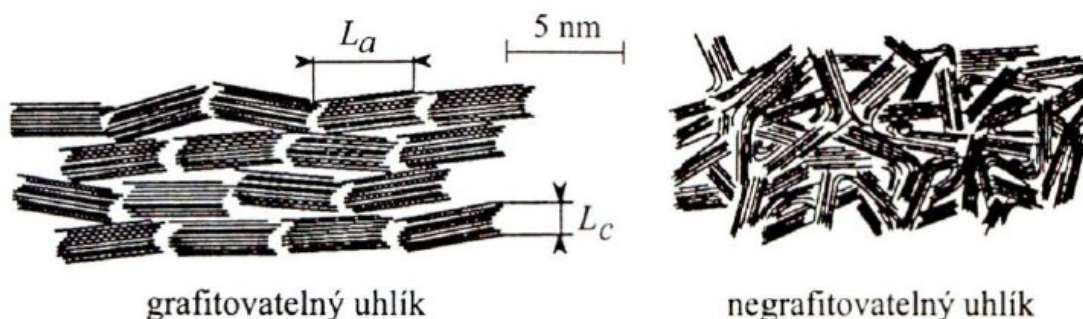
b) Vysokoteplotní proces (nad $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) – vede ke vzniku uhlíkové černi, nebo kompaktnímu pyrolytickému uhlíku. [2]

Nízkoteplotní proces probíhá ve čtyřech fázích:

- Rozbití vazeb původního materiálu za vzniku volných radikálů.
- Reakce mezi volnými radikály za vzniku přechodně stabilních struktur.
- Vnik hexagonálních struktur
- Eliminace atomů vodíku (koncentrace okolo 3 %).

Z předchozího textu je zřejmé, že aby došlo k procesu grafitace, musí se materiál během pyrolytického procesu dostat do kapalného stavu.

Kapalný stav umožňuje vyšší mobilitu molekul, které se následně shlukují do lamel za vzniku anizotropních tekutých krystalů – mikrosfelur. Mikrosfelury představují oddělenou fázi v izotropním kapalném prostředí. S přibývajícím množstvím orientovaných mikrosfelur vzniká anizotropní uhlík, který lze grafitovat (Obr. 1.3). [2]



Obr. 1.3 Grafítace [2]

Grafitace se dá charakterizovat jako proces, při kterém dochází k eliminaci defektů v grafenových vrstvách. K eliminaci dochází především důsledkem růstu krystalů, zmenšení mezilamelární vzdálenosti a efektivnějšího uspořádání rovin. Tento proces probíhá za teplot okolo 2500 °C – 3000 °C. Krystaly po tomto procesu nejsou dokonalé a úroveň transformace závisí především na předchozí orientaci, která se utvářela již při procesu pyrolýzy.

Negrafitovatelné materiály jsou výsledkem karbonizace. U těchto materiálů nedošlo během pyrolýzy ke vzniku kapalného stavu. Obsahují sice lamely, ale ty jsou nahodile orientované a zamezují tak růstu krystalitů a tím i vývoji vlastností. Tyto materiály se vyznačují vysokou tvrdostí. [2]

1.3 Výroba syntetického grafitu

Jedná se o výrobu polotovarů pro další zpracovatelská odvětví, nebo výrobu již konkrétních výrobků.

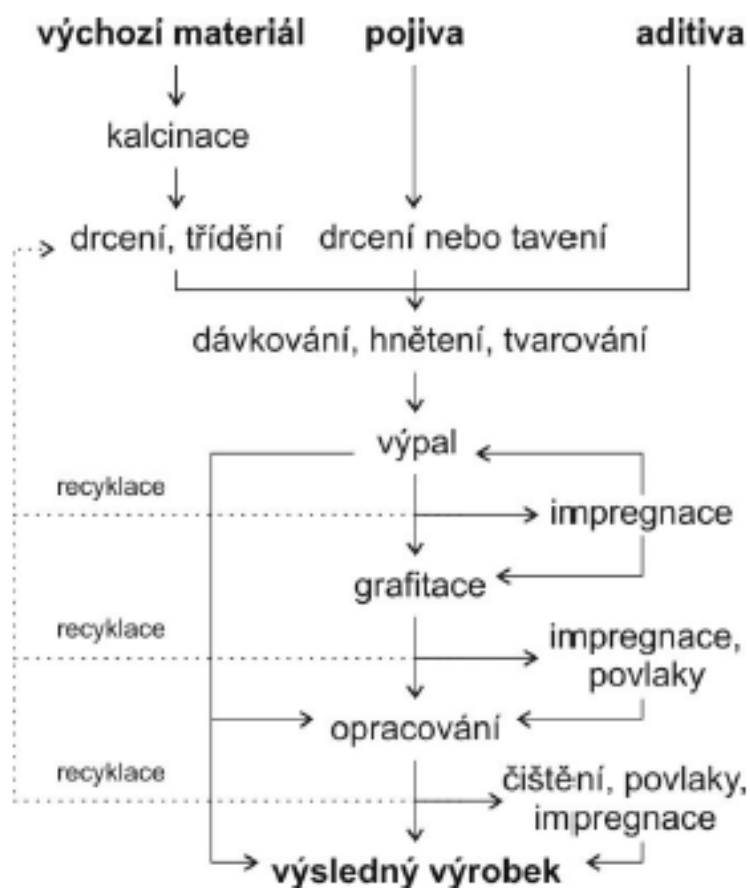


Obr. 1.4. Postup výroby [2]

Na obrázku (Obr. 1.4) je vyobrazeno zjednodušené schéma postupu výroby. Ve skutečnosti se však produkty ze syntetického grafitu od sebe liší a tato odlišnost se promítá ve složitosti výroby. Prvky, které výrazným způsobem ovlivňují výrobu, jsou:

- plniva,
- aditiva,
- pojiva,
- mísení hnětení a tvarování,
- spékání,
- primární impregnace,
- grafitace,
- sekundární impregnace,
- čištění a povlaky.

Výše popsané ovlivňující prvky mění zásadním způsobem schéma postupu výroby (viz. Obr. 1.5). [2]



Obr. 1.5 Postup výroby [2]

Plniva - převážně se používá ropný koks, který se používá například při výrobě anod pro elektrolýzu hliníku, nebo elektrod pro elektrické obloukové pece. Jako další plniva se používají černouhelné smolné koksy, nebo též přírodní grafit.

Aditiva - slouží pro snadnější tvarování, popřípadě obsahují látky ovlivňující koksovatelnost pojiva.

Pojiva - mají za úkol pevně spojit zrna pomocí smáčivého efektu. Pro výrobu se používá černouhelných smolů, syntetických pryskyřic, cukrů, melasy a dehtů.

Mísení hnětení a tvarování - probíhá za teplot okolo 150 °C - 180 °C a cílem je homogenizace směsi a také smísení pojiva s plnivem. Samotné hnětení se liší od velikosti výsledného produktu. Pro produkty u kterých jejich průřez nepřesahuje jejich délku, se využívá vytlačování spolu s hnětením. Naopak u velkých produktů jsou oba procesy odděleny a pro práci se využívá hydraulických lisů.

Spékání - je proces, při kterém pyrolýzou pojidla je získán vypálený uhlíkový artefakt s minimálním množstvím zbytkového vodíku. Během tohoto procesu, může docházet k značným deformacím – *kritické stádium*. V první fázi tohoto procesu dochází k měknutí způsobenému tavením pojidla (okolo 400°C). Materiál se smršťuje a roztahuje, což má za

následek vznik značných napětí. Vhodným postupem se jeví pomalá rychlost ohřevu. Konečná teplota spékání je odvislá od následné operace - *grafitace*. Bude-li následovat, spékání je ukončeno po dosažení teploty 800 °C. V opačném případě se spékání ukončuje v rozmezí teplot 1000 °C - 1200 °C (záleží na množství pojiva).

Primární impregnace se používá pro zvýšení hustoty, mechanických vlastností a elektrické vodivosti. Provádí se pomocí organických činidel, která jsou následně pyrolyzována. Používají se černouhelné smoly. Proces probíhá při teplotách okolo 150 °C-180 °C a tlaku 0,8 MPa - 3 MPa. Tento proces může být i několikanásobně opakován a po něm zpravidla následuje vypálení, které může být spojeno i s grafitací.

Sekundární impregnace pomocí činidel, vede k vylepšení vlastností. Jako činidla se v této fázi využívají:

- *Pryskyřice* – výrobky odolávají plyným a kapalným látkám díky nepropustným vlastnostem. Využití mají například v chemickém průmyslu.
- *Kovy* – používá se měď, stříbro, olovo a slitiny. Výrobky získávají lepší mechanické vlastnosti a vyšší elektrickou vodivost.
- *Skla* – zvyšují odolnost proti oxidaci a korozi.

Čištění a ochranné povlaky vylepšují, jako v předchozím případě, vlastnosti. Čištění se provádí za vysokých teplot pomocí sloučenin halogenidů. Ochranné povlaky jsou na bázi karbidů křemíku, pyrolytického grafitu a cermetů. [2]

1.4 Využití syntetického grafitu

Výrobky ze syntetického grafitu lze vysledovat takřka v každém odvětví lidské činnosti a na základě jeho vlastností se využívají jako:

- *Žárovzdorný materiál* – má dobrou tepelnou vodivost, rozměrovou stabilitu nízkou hmotnost a také dobrou obrobitelnost.
- *Vodič za vysokých teplot* – při teplotách nad 2000 °C patří spolu s wolframem, molybdenem a tantalem mezi jediné použitelné vodiče. Využívá se pro výrobu elektrod do obloukových pecí, elektrod pro spektrografii, elektrod pro elektrojiskrové hloubení, odporů pro odporové pece a jiných.
- *Třecí materiál* – používá se pro snížení tření na stykových plochách spolu zabírajících součástí. Je používán buď přímo, nebo jako přísada pevných maziv. Uplatnění za vysokých a nízkých teplot, tam, kde působí velká odstředivá síla nebo vibrace, v korozních prostředích, nebo pro tzv. bezúdržbová zařízení.

- *Jako ochrana proti korozi* – předchozí uvedené vlastnosti spolu s dobrou odolností proti korozi staví grafit mezi hojně používané materiály v chemickém průmyslu. Zde nachází uplatnění v tepelných výměnících, čerpadlech, výparnících, aj.



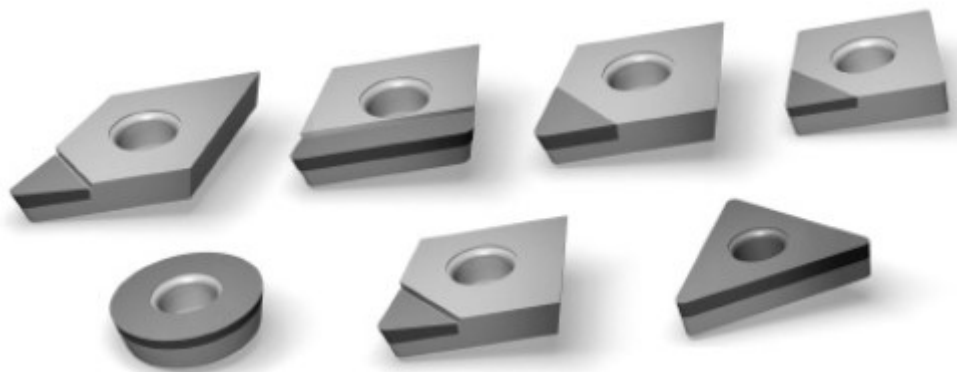
Obr. 1.6 Výrobky z grafitu [5]

1.5 Formy uhlíku a jejich využití

Na začátku kapitoly je psáno, že grafit je za běžných podmínek stabilní formou uhlíku. Uhlík se může vyskytovat v těchto formách:

a) *Diamant* – je přírodní formou uhlíku, jehož výtěžnost je velmi malá (zhruba 6g na 100 tun vytěžené zeminy). Z toho důvodu se využívá:

- *Syntetický diamant*, který se vyrábí za působení vysokého tlaku a teploty – *katalýzou*.
- *Polykrystalický diamant (PCD)*, za působení vysokého tlaku a teploty jsou monokrystaly spojovány pomocí kobaltu a niklu. Takto vzniklý materiál je velmi křehký a použitelný do teploty 700 °C. Využití PCD například pro nástroje na vysokorychlostní obrábění.
- *CVD*, metoda pro získávání diamantových, polykrystalických povlaků. Ty se pak nanášejí za vysokých teplot (2000 °C) na matrice (W, Si, Mo a nástrojové oceli). Během tohoto procesu dochází k reakci s plynem, který je bohatý na uhlík. Využití CVD na povlaky pro obráběcí nástroje.
- *DLC*, vlastnostmi se podobá diamantu. Výrobní proces probíhá za nízkých tlaků a teplot, kdy jsou na povrch matrice nanášeny jednotlivé atomy buď formou rozprašování, nebo odpařováním (pomocí elektrického oblouku, laseru).



Obr. 1.7 Syntetický diamant [6]

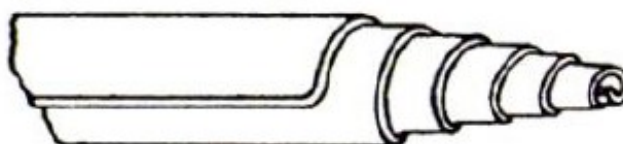
b) *Pyrolytický uhlík* – jedná se o masivní povlak získaný termální dekompozicí uhlovodíků s podkladem zahřátým na vysokou teplotu. Využívá se jako povlak pro povrchovou ochranu, nebo pro zvýšení nepropustnosti vypalovaných uhlíků. Využití má i díky biokompatibilitě v lékařství. Zde se využívá například pro výrobu kloubních náhrad, srdečních chlopní. [3]



Obr. 1.8 Kloubní náhrada [7]

c) *Skelný uhlík* – jedná se o uhlík, který je charakteristický svou neuspořádanou, nekystalickou strukturou. Podobnost se sklem má v lomu a také v nepropustnosti vůči plynům a kapalinám. Vyrábí se karbonizací aromatických polymerů v pevném stavu. Nachází uplatnění v laboratorním prostředí a v lékařství (elektrody srdečních stimulátorů).

d) *Grafitové whiskery* – vznikají za podmínek blízkých trojnému bodu uhlíku (při hodnotách tlaku 1 kPa a teplotě 4773 °C). K dosažení takovýchto podmínek se využívá elektrického oblouku mezi uhlíkovými elektrodami v ochranné atmosféře argonu. Struktura takového materiálu lze připodobnit k srolovaného listu. Mechanické vlastnosti tohoto materiálu jsou vysoké. Pevnost okolo 20 GPa a modul pružnosti až 1000 GPa. Zajímavé je, že materiál lze opakovaně ohýbat (tam a zpět) aniž by došlo k lomu.



Obr. 1.9 Grafitový whisker [3]

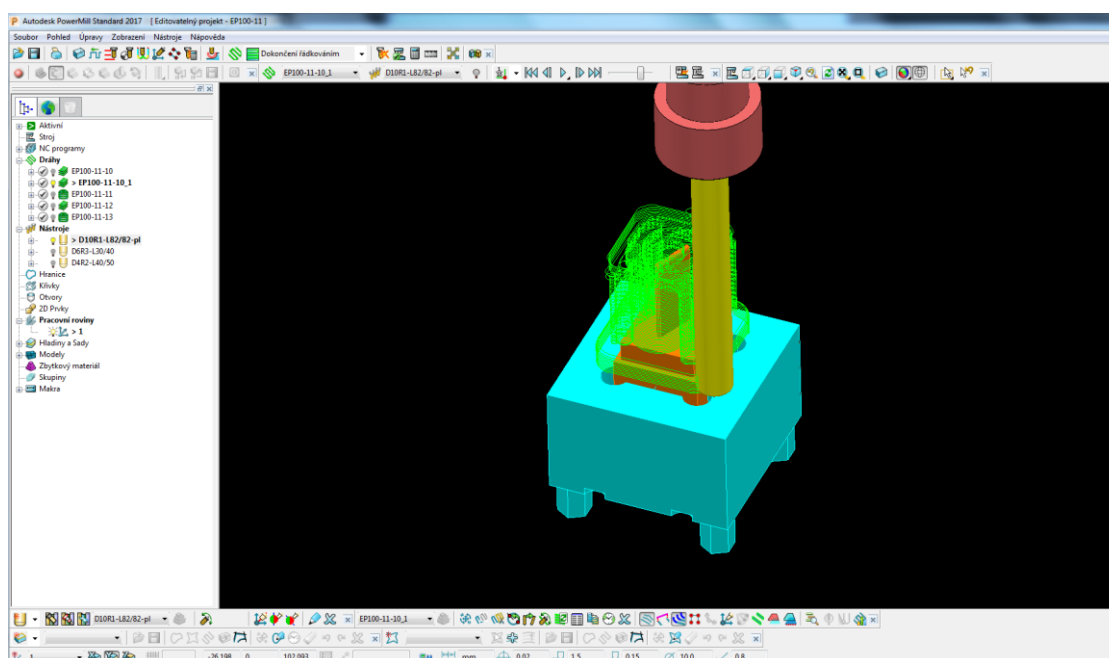
e) *Ohebný uhlík* – jelikož jsou vazební síly mezi vrstvami uhlíku malé, je zde možnost vstupu chemické sloučeniny, která zapříčiní rozestup těchto vrstev bez poškození. Tento proces se nazývá *interkalace*. Mezi sloučeniny, které tento jev vyvolávají, patří alkálie, chloridy a fluoridy kovů. [3]

2 Obrábění grafitu

Nejrozšířenějším způsobem obrábění grafitu je frézování. Výhodou tohoto způsobu obrábění je především výkonnost a kvalita frézovaných ploch.

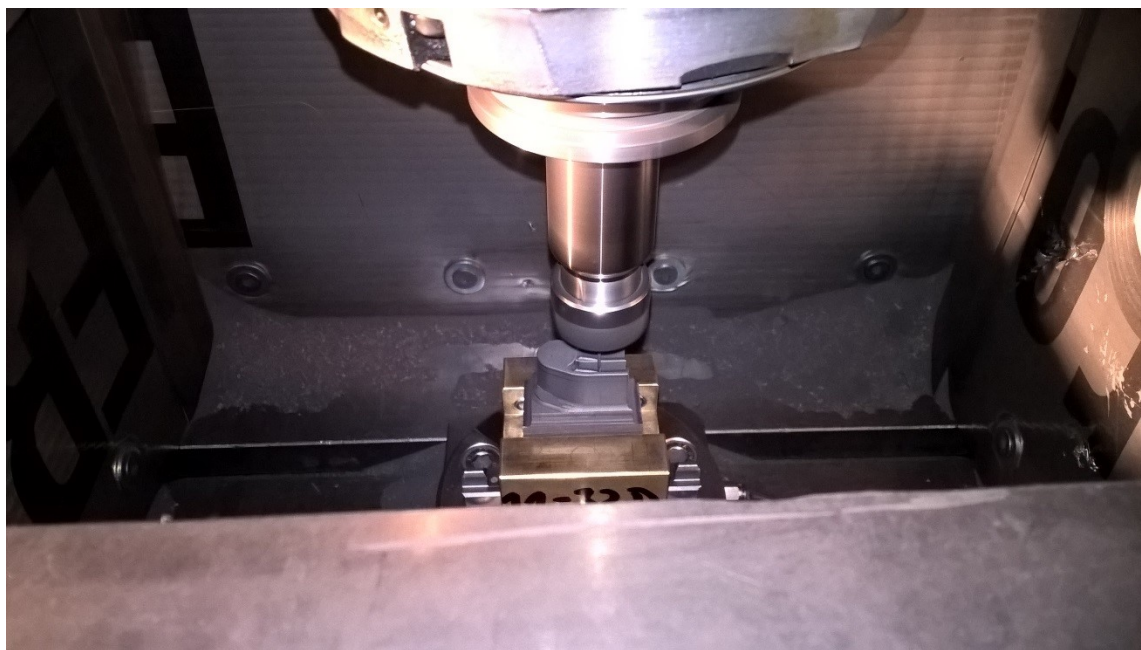
Během frézování grafitu, vniká definovaný řezný klín nástroje - *frézy* do obrobku za vzniku nikoliv třísky, ale shluku drobných částeczek odebraného materiálu – *grafitového prachu*. Ten je během procesu obrábění z obráběcího prostoru odsáván.

Frézování elektrod pro elektrojiskrové obrábění spadá do oblasti tvarového frézování, neboť elektrody jsou nositelkami negativního otisku vzniknuvšího tvaru v obrobku. K přípravě drah pro frézování se využívají CAM obráběcích programů, které usnadňují samotnou přípravu tvorby programů a také, dle možností a limitů frézky, umožňují vyrobit různě definovanou tvarovou plochu.



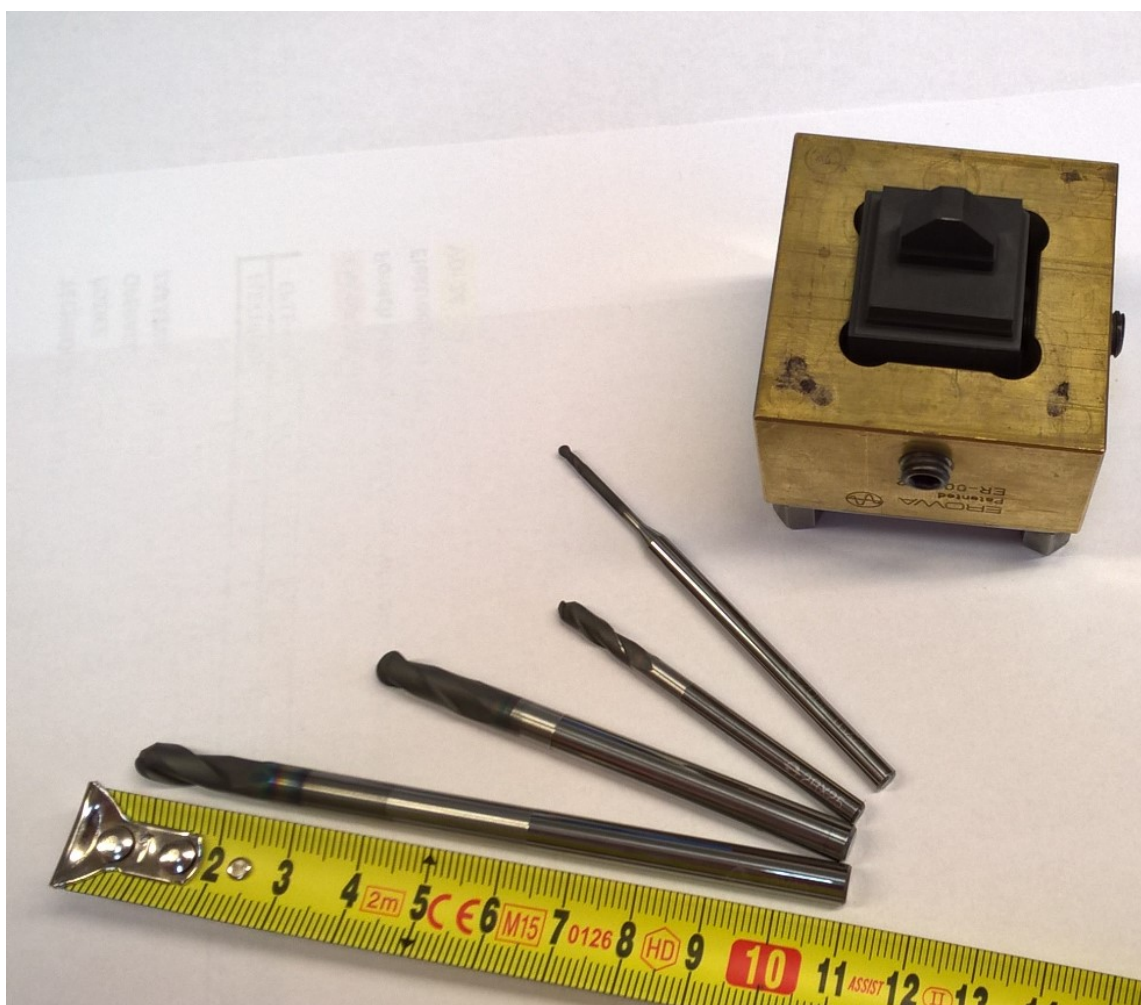
Obr. 2.2 CAM obráběcí program [10]

Zkušenostmi z praxe bylo ověřeno, že smysl otáčení nástroje vůči pohybu obrobku neovlivňuje výslednou kvalitu obrobených tvarových ploch. Je tedy výhodnější využívat během obrábění tzv. obousměrného pohybu, kdy nástroj vůči obrobku se střídavě pohybuje sousledným i nesousledným pohybem. Tento způsob obrábění má vliv i na celkový čas obrábění, neboť využitím obousměrného pohybu dochází k eliminaci přejezdů a napojení mezi jednotlivými drahami je plynulé.



Obr. 2.2 Frézování elektrody [10]

Nástroje pro obrábění grafitu – frézy, se vyrábějí převážně ze slinutých karbidů s ochranným povlakem z polykrystalického diamantu (PKD).



Obr. 2.2 Frézy pro frézování grafitu [10]

2.1 Grafit R8650

Pro tuto práci byl k obrábění vybrán grafit R8650, což je obchodní označení syntetického grafitu vyráběného v izostatických lisech lisovaného do polotovarů tvaru krychle, nebo válce.

Tento produkt na náš trh dodává firma PENTA Trading s.r.o. Dle informací dodavatele se tento grafit, díky jeho složení – ultrajemné zrně, používá pro výrobu nástrojových elektrod pro elektrojiskrové hloubení, a to pro speciální dokončovací aplikace. Například pro výrobu úzkých tenkých elektrod pro hloubení tvarových žebířků ve tvarových dutinách forem pro vstřikování plastů.

Na obrázku níže jsou uvedeny typy grafitů, které jsou na náš trh jmenovaným dodavatelem dodávány. U každého typu grafitu jsou uvedeny fyzikální vlastnosti a také informace, jaké drsnosti je možné s daným typem grafitu dosáhnout. [8]

Fyzikální vlastnosti	Jednotky	R 8340	R 8500	R 8510	R 8650	R 8710
Hustota	g/cm ³	1,72	1,77	1,83	1,84	1,88
Pórovitost	%	15	13	10	10	10
Zrnitost	μm	15	10	10	7	3
Velikost pórů μm		2	1,5	1,5	0,8	0,6
Magnetic. vodivost	x10 ⁻² cm ² /s	15	10	4	3	1
Tvrdost	Rockwell B	HR 10/100	HR 5/100	HR 5/100	HR 5/100	HR 5/100
	Shore	50	65	70	75	80
Pevnost v ohybu	N/mm ²	45	50	60	65	85
E modul	kN/mm ²	10,5	10,5	11,5	12,5	13,5
Specifický elektrický odpor	μΩm	12	14	13	14	13
Tepelná vodivost	W/mK	90	80	100	90	100
Teplot.roztažnost (20-200° C)	x 10 ⁻⁶ /K	2,9	3,9	4,0	3,9	4,7
Maximální obsah nečistot	%	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Ra max (μm)	0.4	0.56	0.80	1.12	1.6	2.24	3.15	4.5	6.30	9.00	12.5	18.0
VDI	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45

Obr. 2.1.1 Vlastnosti grafitů [8]

2.2 Příprava grafitových polotovarů

Grafit se nakupuje a dodává ve formě bloků, nejčastěji tvaru krychle a válce. Dodavatelé grafitů nabízí na přání zákazníka i takovou službu, při které je grafit dodán ve formě polotovarů požadovaných rozměrů. Tím odpadá zákazníkovi následná práce v podobě přípravy grafitových polotovarů. Tento způsob dodávání není vždy vhodný, neboť ne vždy je předem znám tvar a rozměr potřebné tvarové elektrody. V takovém případě je potřeba dodaný polotovar rozdělit vhodnou metodou a následně upravit upínací plochy.

K dělení polotovarů se nejčastěji používá:

- *Ruční pila*, používá se jen ve výjimečných případech. S větším počtem kusů připravovaných polotovarů je neefektivní. Nelze spoléhat ani na dodržení rozměrových požadavků.
- *Strojní pásová pila*, nejčastěji používaná metoda dělení polotovarů. U této metody dělení je zapotřebí během řezání odsávat vzniklý grafitový prach.



Obr. 2.2.1 Strojní pásová pila [14]

K úpravě upínacích ploch se nejčastěji používá:

- *Univerzální nástrojářská frézka*, její výhoda spočívá ve snadné obsluze a vyhovující kvalitě opracování frézovaných ploch. Při vhodném využití univerzálních upínek, dorazů a číslíkového odměřování lze dostatečně zvýšit i produktivitu přípravy polotovarů.



Obr. 2.2.3 Univerzální nástrojářská frézka [15]

- *Rovinná bruska*, využívá se v případech, kdy je zapotřebí docílit vysoké přesnosti upínacích ploch.



Obr. 2.2.4 Rovinná bruska [15]

U obou výše uvedených strojů (univerzální nástrojářská frézka i rovinná bruska) je potřeba během obrábění dostatečně odsávat grafitový prach.

2.3 Frézování tvarových elektrod z grafitu

Obrábění grafitu je jedním z odvětví strojní výroby. Při tomto způsobu obrábění vniká definovaný řezný klín obráběcího nástroje do obrobku za vniku nikoliv třísky (jak tomu bývá zvykem u ocelových materiálů), ale dochází k oddělování drobných částeczek materiálu - grafitového prachu. Jedná se o suchý proces obrábění, kdy se nevyužívá řezných kapalin, ani chladících médií (vzduch, emulze).

K frézování tvarových elektrod z grafitu se využívá převážně vertikálních CNC obráběcích strojů (frézek). Řízení bývá buď v plynulých tří osách, nebo v plynulých pěti osách. Stroje v úpravě pro frézování grafitu se dají koupit napřímo, nebo se upravují stávající stroje, které dříve sloužili pro obrábění oceli. Aby však bylo možné na takových strojích tvarové elektrody frézovat, je potřeba na nich provést úpravy.

Úpravy se týkají:

- Pořízení upínacího systému pro tvarové elektrody z grafitu.
- Úprava obráběcího prostoru.
- Ochrana elektro zařízení stroje.
- Odstranění vany pro chladicí médium (emulzi) a dopravníku třísek.

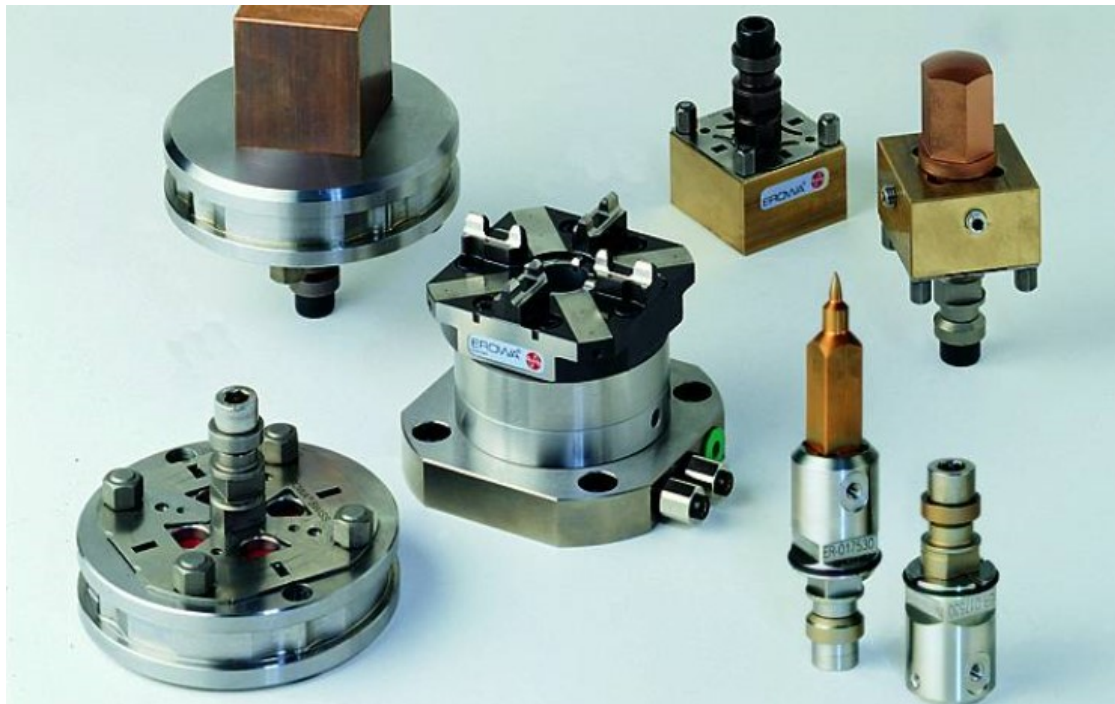
Upínací systém pro frézování elektrod - upínání musí zaručit jednoduchost, opakovatelnou přesnost a také univerzálnost. Předpokladem je pořízení takového upínacího systému, který je shodný s upínacím systémem na dané elektrojiskrové hloubičce. Mezi nejčastěji používané upínací systémy patří:

HIRSCHMANN – jedná se o univerzální upínací systém vhodný jak pro ruční tak automatickou výměnu (ze zásobníku). Upnutí do stroje nebo paletového systému je provedeno pomocí kaleného prizmatického středícího trnu. Opakovatelná přesnost upínání je ve 0,002 mm. [8]



Obr. 2.3.1 Upínání Hirschmann [8]

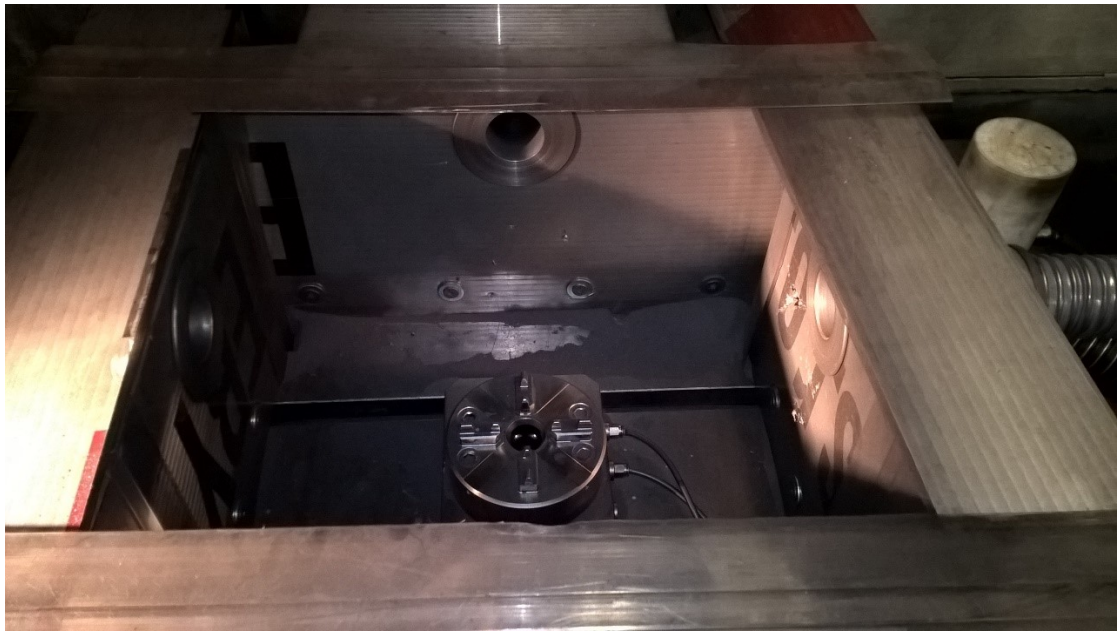
EROWA – jedná se také o univerzální upínací systém vhodný jak pro ruční tak automatickou výměnu (ze zásobníku). Upnutí do stroje nebo paletového systému je provedeno pomocí kuželového trnu zajištěného šroubem. Opakovatelná přesnost upínání je obdobná, jako u předchozího upínacího systému. [9]



Obr. 2.3.2 Upínání EROWA [9]

Úprava obráběcího prostoru – tato úprava spočívá ve vyřešení přímého odsávání grafitového prachu v okolí obráběné tvarové elektrody. Jedná se o jednu z nejdůležitějších úprav, neboť grafitový prach vlivem víření nejen ulpívá na nekrytých místech stroje, ale dostává se také do okolního prostoru stroje, čímž ohrožuje na zdraví i obsluhu stroje.

Na obrázku (Obr. 2.3.3) je odsávání řešeno tím způsobem, že se v obráběcím prostoru vytvořilo bednění s otvory pro nasazení hadic výkonného průmyslového vysavače. Průmyslový vysavač musí být konstrukčně řešen tak, aby mohl nasávat grafitový prach – účinná filtrace.



Obr. 2.3.3 Bednění okolo obráběcího prostoru [10]



Obr. 2.3.4 Průmyslový vysavač [10]

Ochrana elektro zařízení stroje – aby se zabránilo vniknutí grafitového prachu do prostoru elektro skříně, a tím se zabránilo případným škodám na elektronických dílech (např. zkratování procesorů), je opatřena výkonnou klimatizační jednotkou. Výhodou této úpravy je i zvýšení účinnosti chlazení elektronických dílů - ochrana proti přehřívání.



Obr. 2.3.5 Klimatizační jednotka [10]

2.4 Frézovací nástroje pro obrábění tvarových elektrod z grafitu

Při obrábění grafitu dochází k největšímu opotřebení u hrubovacích strategií, které je dáno především množstvím odebíraného materiálu a také mechanickými vlastnostmi obráběného grafitu. Z mechanických vlastností grafitu, které ve velké míře ovlivňují proces obrábění je jeho tvrdost. Grafit je velice tvrdý a zároveň křehký materiál. Nástroje pro obrábění grafitu se řadí mezi nástroje speciální, neboť aby vydržely v řezu co nejdéle, musí být opatřeny ochranným povlakem ze syntetického grafitu. Tyto nástroje nelze používat pro frézování oceli, neboť uhlík, který je hlavní složkou ochranného povlaku má vysokou afinitu k železu. Tato afinita se projevuje vázáním atomů uhlíku na atomy železa, což vede k rychlé ztrátě ochranné diamantové vrstvy a následnému opotřebení nástroje.

Nástroje pro obrábění tvarových elektrod z grafitu mohou být v provedení jako monolitní nebo s vyměnitelnou břitovou destičkou (VBD). V obou případech je základem matrice tvořená karbidy o prvcích, jako je wolfram, křemík, molybden. Ochranný diamantový povlak se na matrici nanáší převážně metodou CVD. Jednou z metod jak může probíhat výroba je ten, že se nástroje ze slinutých karbidů osazují polykrystalickou diamantovou fólií, která je připravena tepelně aktivovaným CVD procesem z metanu a vodíku. Diamantová fólie se následně letuje na těleso nástroje, brousí a finálně lapuje. [12]

Hrubovací nástroje

Pro hrubování se používají převážně toroidní frézy v provedení s vyměnitelnými břitovými destičkami. Takovýto nástroj se vyznačuje jednoduchou údržbou a to především při výměně řezné části nástroje (VBD), kdy po výměně vyměnitelné břitové destičky není zapotřebí znovu zaměřovat nástroje. Obecně lze podotknout, že při operaci hrubování se nevyžaduje dosažení přesnosti, ale hledí se na co největší a nejrychlejší úběr materiálu.

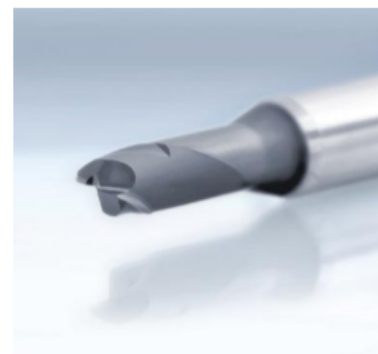
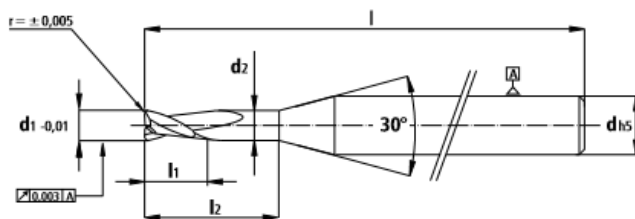


Obr. 2.4.1 Toroidní fréza Ø10R1 (VBD) [10]

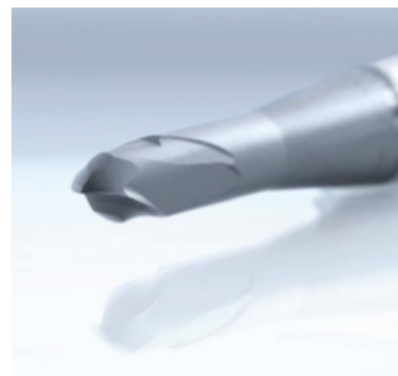
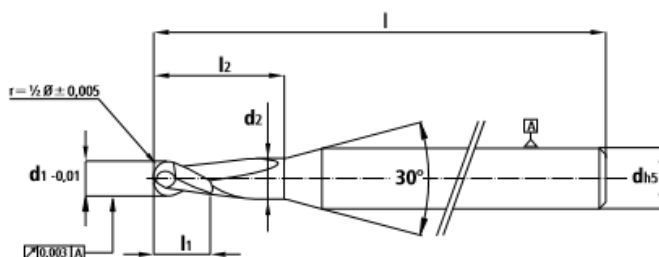
Na obrázku (Obr. 2.4.1) je vyobrazena toroidní fréza s vyměnitelnou břitovou destičkou o Ø10R1 (od firmy LMT-FETTE). Označení vyměnitelné břitové destičky, dle výrobce, je LC 610A. Jedná se tedy o vyměnitelnou břitovou destičku vyrobenou ze slinutého karbidu a ochranný diamantový povlak je zhotoven metodou CVD. [10]

Dokončovací nástroje

Pro dokončovací operace se využívá převážně monolitních nástrojů a to frézy toroidní a kopírovací. V některých případech jsou tyto nástroje v provedení s vyměnitelnou břitovou destičkou. Pro dokončovací operace se ponechává minimální přídavek vzhledem k velikosti a složitosti tvarové elektrody a tudíž i opotřebení řezné části dokončovacích nástrojů je minimální. Tato skutečnost se projevuje i na celkové životnosti dokončovacích nástrojů (od prvního nasazení nástroje do jeho výměny), která je vyšší než u nástrojů hrubovacích.



Obr. 2.4.2 Monolitní toroidní fréza [13]



Obr. 2.4.3 Monolitní kopírovací fréza [13]

2.5 Moderní směry v obrábění grafitu

Na čtrnácté mezinárodní výrobní konferenci konané v Číně (2011) byla představena studie o vývoji ochranných diamantových povlaků pro obráběcí nástroje a tím i k zvýšení jejich řezného výkonu.

Studie spočívala v porovnání dvou typů ochranných diamantových povlaků a to, konvenčního mikrokrystallického diamantu (označeného jako MCD) a ochranného diamantového povlaku obohaceného nitridem bóru (označeného jako BDD). Oba povlaky byly nanášeny na řeznou část kopírovací frézy. Matrice těchto fréz byly vyráběné z komerčně dostupných materiálů, a to slinutého karbidu (WC-Co). U povlaku MCD byla použita standardní metoda povlakování (CVD). U povlaku BDD byla použita metoda spočívající v nanášení vláken v atmosféře horkých chemických par (HFCVD).

Testy nanášených diamantových povlaků byly založeny na zkoumání dosažené kvality a vlastností, pomocí autoemisního rastrovacího elektronového mikroskopu (FESEM) a Ramanovy spektrometrie (metoda pro identifikaci látek, při určování jejich složení a

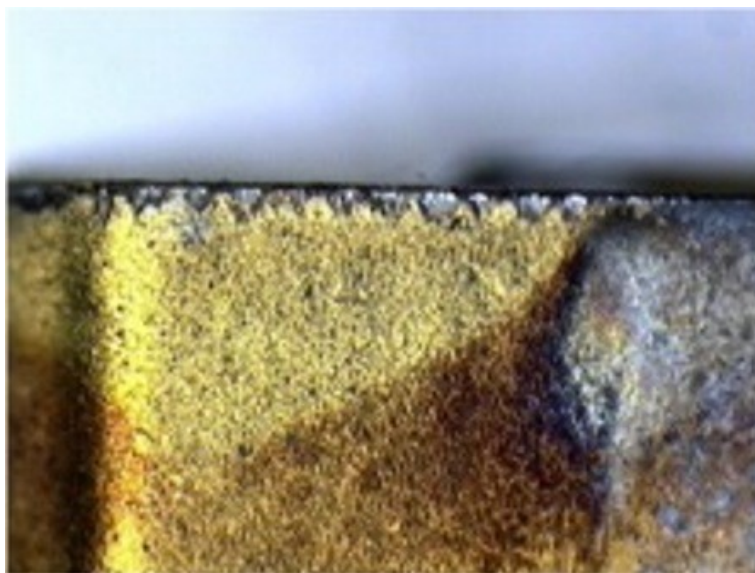
struktury). Pak následoval zátěžový test spočívající ve frézování grafitových materiálů. Do této části testu byly zakomponovány i nástroje bez povlaku.

Výsledky experimentu ukázaly, že povlaky BDD mají vyšší přilnavost k podkladu a vykazují mnohem menší opotřebení na hřbetu řezné části nástroje, což vede k výraznému prodloužení životnosti ve srovnání s nástroji s povlakem MCD, nebo nástroji bez povlaku. Výsledky tohoto výzkumu mají velký význam pro zvýšení produktivity a kvality obrábění grafitových materiálů. [16]

Obdobné studie, jako v předchozích případech, jsou popsány také v publikaci *Trendy a vývoj v oblasti výroby materiálů a řezných nástrojů z polykrystalického diamantu a kubického nitridu bóru*.

V této publikaci je zaznamenán průběh vývoje stále se zlepšujících vlastností zmiňovaných materiálů, který raketově odstartoval především automobilový a letecký průmysl. [24]

Ve studii *Hodnocení výkonu obrábění s nástroji z polykrystalického diamantu a kubického nitridu bóru*, jsou popsány experimenty, během kterých jsou popsané nástroje testovány při obrábění hliníkové slitiny vyztužené kompozitním kamenem (z karbidu křemíku). [25]



Obr. 2.5.1 Opotřebený břit nástroje. [25]

3 Elektrojiskrové hloubení

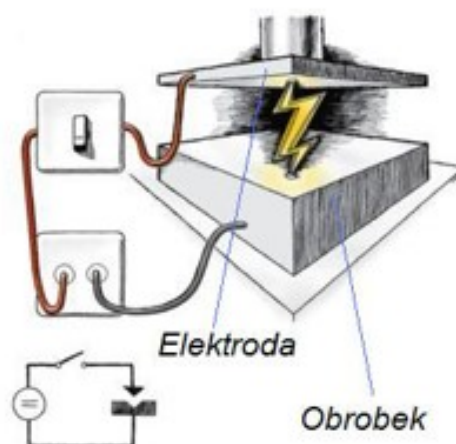
Je základní metodou elektroerozivního obrábění a používá se převážně pro vytváření tvarů a tvarových dutin, které jsou konvenčními metodami neobrobitelné. Tato metoda je využívána i z hlediska designového, především ve finálních úpravách povrchu výrobku (na základě volby v nastavení stroje, lze vytvořit jemnou nebo hrubou povrchovou strukturu – tzv. dezén).

3.1 Princip elektrojiskrového hloubení

Jedná se o fyzikální jev založený na odebrání částeczek materiálu účinkem tepelného a tlakového působení elektrických výbojů. Elektrody jsou připojeny ke zdroji stejnosměrného napětí s určitým vnitřním odporem. Mezera mezi elektrodami se pohybuje v rozmezích 0,01-0,5 mm a tato mezera je vyplněna kapalným, nebo plynným médiem, tzv. dielektrikem.

Princip elektroerozivního hloubení je ten, že za vhodných podmínek dochází k elektrickým výbojům (kdy vznikají lokální teploty až 12 000 °C) mezi anodou a katodou v kapalně lázni dielektrika. Při těchto výbojích dochází k odebrání materiálu, ten se odtavuje a zplyňuje, za vzniku kráterů. Anodou je v tomto případě obrobek a katodou je tvarová nástrojová elektroda. Elektroda má negativní tvar výsledné tvarové dutiny v obrobku.

Parametry elektrojiskrového obrábění jsou závislé na tvaru a energii impulzů, velikosti jiskrové mezery, typu a vlastnosti dielektrika. V neposlední řadě parametry elektrojiskrového hloubení ovlivňuje i tvar a vlastnosti použité grafitové elektrody a vlastnosti daného obrobku. [17]



Obr. 3.1.1 Princip elektrojiskrového hloubení. [26]

Fáze elektrojiskrového hloubení - elektrojiskrové hloubení, tedy jeho princip, lze rozdělit na určitý počet fází, které jsou pro tento typ obrábění typické a které se odvíjí od časového průběhu elektrického výboje.

Časový průběh elektrického výboje elektrojiskrového hloubení se dělí na tyto fáze:

1. *Fáze* – elektrody se přibližují. Vlivem nerovností se elektrody setkají v místech s nejmenší vzdáleností. Elektricky vodivé částice jsou vtahovány do tohoto místa. Roste napětí a proud je nulový.

2. *Fáze* – elektricky vodivé částice vytváří můstky, jsou základem pro zapálení výboje. Izolační vlastnosti kapaliny klesají. Napětí dosahuje maximálních hodnot. Proud je nulový.

3. *Fáze* – ve vzniklém elektrickém poli dochází k uvolňování elektronů, které se tříští o neutrální částice – *ionizace prostředí*. Elektroдами začíná pomalu protékat proud, napětí klesá.

4. *Fáze* – ionty obalují střed budoucího výbojového kanálu a klesá odpor výbojového kanálu. Dochází k protékání proudu, růstu proudové hustoty a tvorby vodivého kanálu z plazmy. Teplota na povrchu elektrod narůstá a dochází k odpařování částeczek elektrod a kapaliny. Napětí na elektrodách klesá.

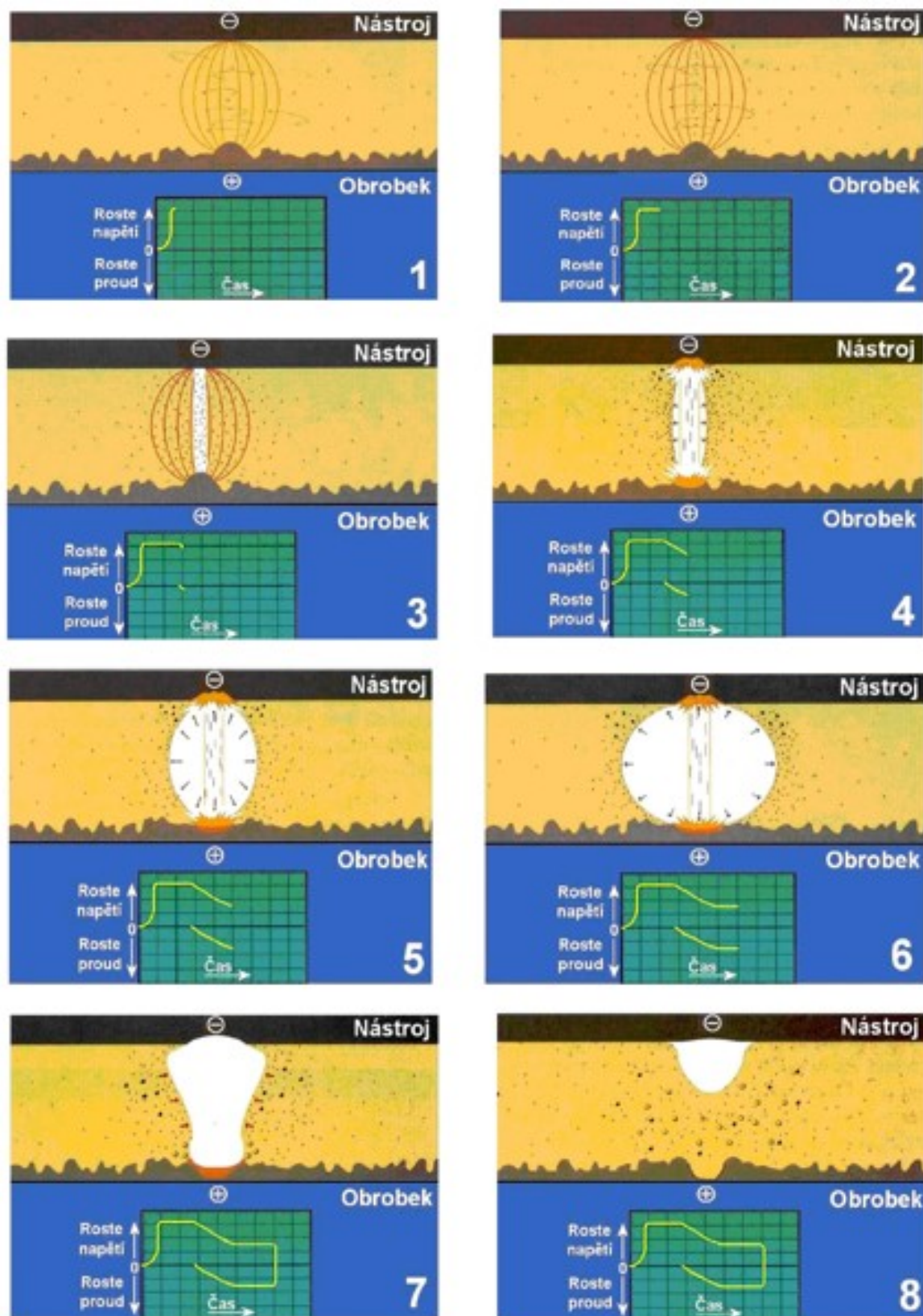
5. *Fáze* – začíná odpařování dielektrika a vzniká plynová bublina. Dochází také vlivem nárazu částic k uvolňování vysokého množství tepelné energie. Proud dosahuje maxima a napětí se blíží hodnotě tzv. *zápalného napětí*.

6. *Fáze* – plynová bublina dosahuje maximálních hodnot tlaku a teploty. Dochází k intenzivnímu natavování a odpařování materiálu. Proud i napětí jsou stabilizovány.

7. *Fáze* – napětí a proud klesá na nulu, dochází k implozi bubliny a vzniká kráter (materiál z kráteru je rozptýlen v dielektriku).

8. *Fáze* – do kráteru vniká dielektrikum, které ochlazuje taveninu a zabraňuje tak prostupu tepla do hloubky.

9. *Fáze* – návrat na začátek. V dielektriku jsou rozptýleny volné ionty a nečistoty z předchozí eroze, což je základ pro nový výbojový kanál. [18]

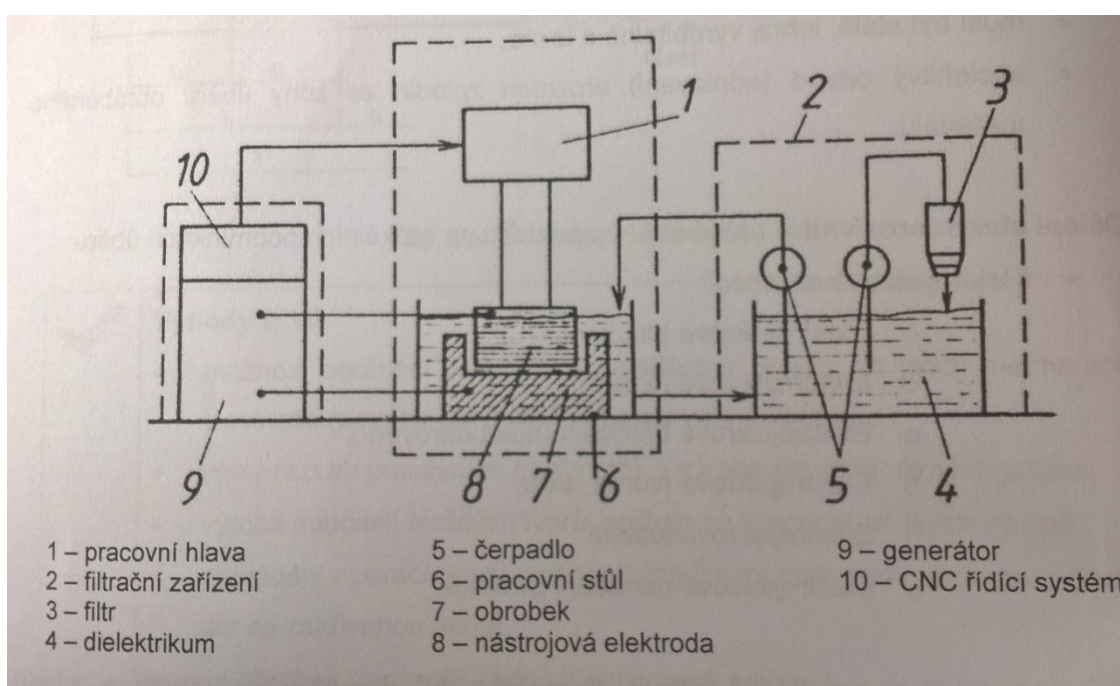


Obr. 3.1.2 Fáze elektrojiskrového hloubení [18]

3.2 Elektrojiskrové hloubičky

Na dnešním trhu je mnoho výrobců, kteří jsou schopni zákazníkovi vyrobit elektrojiskrovou hloubičku doslova na míru. Najít však mezi těmito výrobci takového, který by mohl být označen za leadera, není tak jednoduché. Vývoj těchto strojů postupuje neustále kupředu a s nadsázkou se dá říci, že to co platilo včera, dnes již neplatí. Proto i malý výrobci dosahují na své velké konkurenty kvalitou a zlepšujícími se parametry svých strojů.

Pokud by na tyto stroje bylo pohlíženo jako na živý organismus, srdcem takového stroje je pulzní generátor a mozkem pak výkonný řídicí CNC systém. Vhodná kombinace těchto dvou prvků je základem pro kvalitní výkonnou elektrojiskrovou hloubičku.



Obr. 3.2.1 Schéma elektrojiskrové hloubičky [17]

Parametrů, kterých se při elektrojiskrovém hloubení dosahuje:

- pracovní napětí: až 50 V,
- proud: 0,5 – 320 A (i více),
- frekvence: 50 – 105 Hz
- proudová hustota: $10^8 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,
- čas nabíjení: $10^{-2} - 10^{-5} \text{ s}$
- čas vybíjení: $10^{-9} - 10^{-5} \text{ s}$
- rychlost obrábění: $0,01 - 0,1 \text{ mm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,
- přesnost obrábění: $\pm 0,01 (\pm 0,005) \text{ mm}$,
- vzdálenost mezi elektrodami (GAP): 0,01 – 0,8 mm. [17]



Obr. 3.2.2 Elektrojiskrové hloubičky [10]

3.3 Programování elektrojiskrové hloubičky

Jak již bylo zmíněno, výrobců elektrojiskrových hloubiček je mnoho a každý se snaží spolu se strojem dodat, nejlépe svůj, optimálně vyladěný řídicí systém. Rozdíl v řízení dnešních elektrojiskrových hloubiček a těch, které byly vyrobeny před patnácti a více lety je markantní. Obsluha starších typů strojů musela mít matematické a fyzikální cítění, neboť většinu nastavení, z důvodu slabých výkonů používaných počítačů, musela provádět ručně pomocí výpočtů a tabulek. Tyto nároky na dnešní obsluhu kladeny nejsou a neustále se snižují. Uživatelské prostředí řídicího systému je natolik jednoduché a intuitivní, že stačí znát z jakého materiálu je vyroben obrobek (tedy anoda) a z jakého materiálu je vyrobena nástrojová tvarová elektroda (tedy katoda), jak velká je hloubená oblast, jaký je podrozměr nástrojové tvarové elektrody (tzv. jiskrová mezera) a jaké finální drsnosti se má dosáhnout. O všechny ostatní nastavení stroje se pak postará řídicí systém. Některé řídicí systémy dokonce ulehčují i technologickou přípravu, kdy na základě doplnění informací o daném obrobku, velikosti hloubené oblasti a přídavku z předchozích technologií, vygenerují informaci o hodnotě podrozměru nástrojové tvarové elektrody, odhadované době hloubení a celkových nákladech (v korunách, nebo množství spotřebované energie).

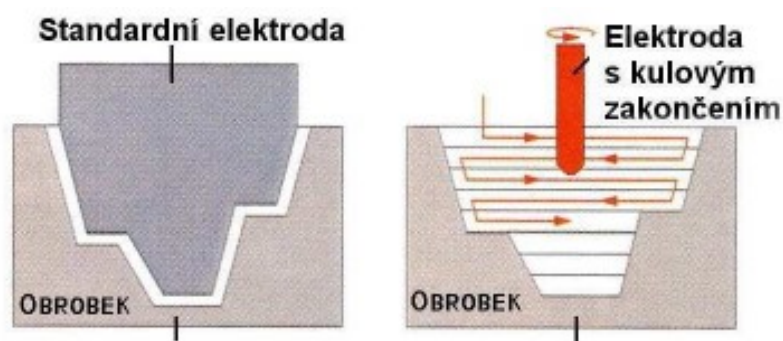
Usnadněná je i samotná údržba stroje, kdy řídicí systém si sám hlídá dobu výměny pro součástky a média k tomu určená. V případě poruchy, diagnostikou určí pravděpodobné místo vzniku, čímž je usnadněn případný servisní zásah.

Pohyby nástrojových elektrod

Při elektrojiskrovém obrábění je většinou obrobek pevně upnut na pracovní stůl elektrojiskrové hloubičky (např. za pomoci upínek, magnetů). Veškerý pohyb tedy vykonává nástrojová tvarová elektroda. Řídicí systém elektrojiskrové hloubičky umožňuje:

- *Vertikální pohyb v ose Z*, jednoduchý způsob elektrojiskrového obrábění, kdy pohybem nástrojové tvarové elektrody v ose Z dochází k jejímu otisku do obrobku.
- *Lineární pohyb ve dvou osách (lineární interpolace)*, nástrojová elektroda se pohybuje po přímce ve dvou osách současně.
- *Kruhový pohyb ve dvou osách*, nástrojová elektroda opisuje kružnice v rovině.
- *Pohyb ve dvou osách (odvalování)*, nástrojová elektroda se otáčí okolo osy Z (rotací osy C) a v rovině je vedena v osách X a Y.
- *Pohyb po šroubovici*, nástrojová elektroda je vedena v ose Z za současného otáčení C osy.
- *Lineární pohyb ve třech osách*, nástrojová elektroda se pohybuje po přímce v prostoru.

Na základě výše uvedených pohybů lze elektroerozivní hloubičku naprogramovat tak, že tvarovou dutinu v obrobku lze vytvořit buď tvarovou elektrodou, která je negativem vzniknuvší dutiny v obrobku, nebo jednoduchou nástrojovou elektrodou s kulovým zakončením, která dutinu v obrobku vytvoří kombinací všech výše uvedených pohybů. [18]



Obr. 3.4.1 Schéma zjednodušení elektrody [18]

3.4 Požadavky na dielektrikum

- Zabezpečuje vzdálenost mezi elektrodami (anodou a katodou), aby přechod proudu mezi nimi vyústil do výboje.
- Aby došlo k opětovnému obnovení izolačních vlastností dielektrika po výboji, musí mít nízkou viskozitu a dobrou smáčivost.
- Chemická neutralita pro zajištění zamezení vzniku korozního prostředí.
- Vysoká teplota hoření, bránící tak vzniku vzplanutí během obrábění.
- Musí zabezpečit ochlazování elektrod a odplavování částic obráběného materiálu.
- Z hlediska bezpečnosti a ochrany zdraví, nesmí vytvářet jedovaté výpary, popřípadě nevytvářet nepříjemný zápach. [17]

3.5 Materiál nástrojových elektrod

Grafit, nejpoužívanější materiál pro elektrojiskrové hloubení. Výhodou je nízká hmotnost, pořizovací cena. Nevýhodou je, že znečišťuje stroje i dielektrikum.

Měď, má dobrou elektrickou vodivost a vykazuje během obrábění nízkou míru opotřebení. Využívá se především pro dokončování povrchů (nižší výboje proudu a krátké impulzy). Používá se pro obrábění například karbidů wolframu. Nevýhodou je její horší obrobitelnost ve srovnání s grafitem.

Měď-wolfram a stříbro – wolfram, jedná se o velice drahé materiály, kdy nástrojové elektrody jsou vyráběny slinováním wolframu s mědí nebo stříbrem. Využití pro operace, kde se hůře dostává dielektrikum – úzká hluboká žebra.

Měď-grafit, pro obrábění karbidu wolframu.

Mosaz, má vysokou míru opotřebení. Používá se tam, kde není potřeba dodržet rozměrovou přesnost (hloubení úzkých otvorů).

Wolfram, pro výrobu malých průměrů do rozměru 0,2 mm. [17]



Obr. 3.6.1 Grafitové elektrody v upínačích od EROWY [10]

4 Testování trvanlivosti VBD

4.1 Trvanlivost a životnost nástroje

Trvanlivost řezného nástroje lze definovat jako součet všech čistých (strojních) časů řezání, od začátku obrábění, až po opotřebení břitu nástroje na předem stanovenou hodnotu vybraného kritéria. K přerušení řezání tedy dochází z důvodu dosažení předem stanoveného opotřebení břitu nástroje za současného dodržení stanovených kritérií (dodržení požadavků tvarových, rozměrových a také kvality povrchu).

Životnost řezného nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí nebo též jako celková doba funkce od prvního nasazení, až po jeho vyřazení. U nástrojů, které lze brousit se životnost stanovuje dle počtu možných broušení funkční části nástroje. U vyměnitelných břitových destiček je pak životnost stanovena počtem řezných hran. [19]

a) Výpočet životnosti pro přebrušované nástroje:

$$Z = \sum T_i = (x + 1) \cdot T$$

T_i – jednotlivé trvanlivosti (min)

T – aritmetický průměr hodnot T_i (min)

x – počet možných ostření nástroje [19]

b) Výpočet životnosti pro nástroje s vyměnitelnými břitovými destičkami:

$$Z = \sum T_i = q \cdot T$$

T_i – jednotlivé trvanlivosti (min)

T – aritmetický průměr hodnot T_i (min)

q – počet použitelných ostří destičky [19]

Trvanlivost a opotřebení nástroje jsou odvislé od metody obrábění, vlastnostech materiálu řezného nástroje a obrobku a řezných podmínek (řezná a posuvová rychlost, šířka záběru ostří, řezné prostředí). Z uvedených řezných podmínek nejvíce ovlivňuje trvanlivost řezná rychlost. [19]

c) T - v_c závislost (Taylorův vztah):

$$T = \frac{C_T}{v_c^m} [m \cdot min^{-1}]$$

c_T – konstanta (10^9 - 10^{13})

v_c – řezná rychlost ($m \cdot min^{-1}$)

m – exponent (míra závislosti řezné rychlosti na trvanlivosti) [19]

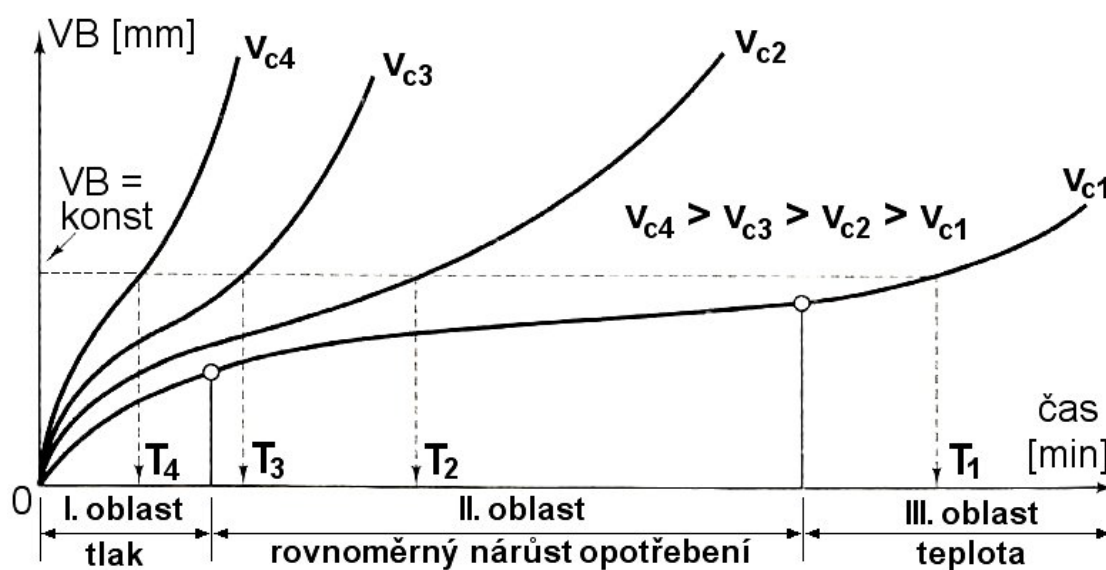
Jelikož hodnota konstanty c_T je vysoká a tím nepraktická pro výpočet, využívá se vzorce upraveného. [19]

d) Upravený vzorec T - v_c závislosti (Taylorova vztahu):

$$v_c = \frac{c_v}{T^{1/m}} [m \cdot min^{-1}]$$

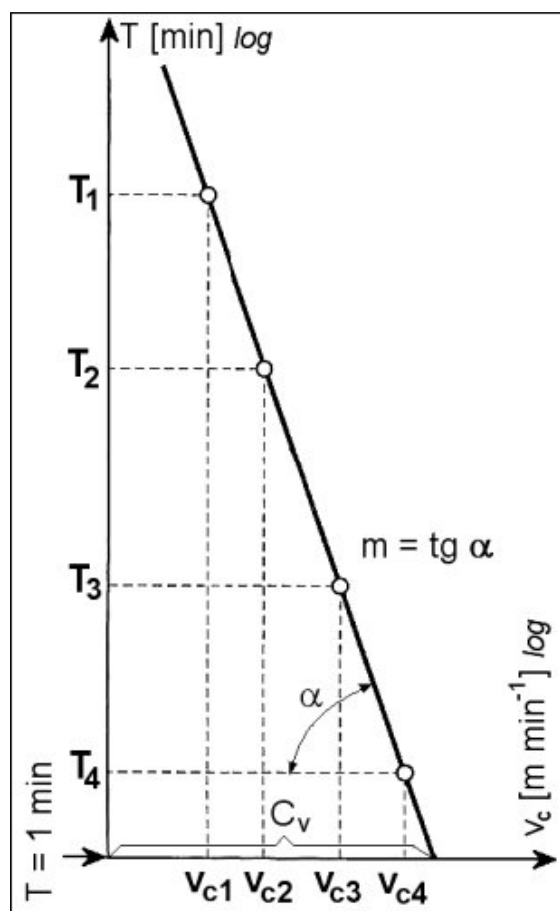
c_v – konstanta (10^2 - 10^3), tato konstanta byla odvozena ze vztahu ($c_v = c_T^{\frac{1}{m}}$) [19]

Postup pro stanovení základních hodnot T - v_c závislosti pro konkrétní soustavu, řezný nástroj a obráběný materiál, vychází z definice trvanlivosti. Kromě řezné rychlosti jsou ostatní řezné podmínky neměnné. Při minimálně čtyřech různých hodnotách řezné rychlosti se sleduje nárůst opotřebení řezného nástroje v čase a hodnota se zaznamenává do grafu. Pro rovnoměrné rozložení bodů pro konstrukci grafu T - v_c závislosti, předepisuje norma ČSN ISO 3685 hodnoty řezných rychlostí dle materiálu řezného nástroje (pro řezný nástroj ze slinutého karbidu jsou předepsány hodnoty řezných rychlostí z řady R20). [19]



Obr. 4.1.1. Graf závislosti opotřebení na čase, při různých řezných rychlostech. [19]

Z grafu (Obr. 4.1.1.) po zvolení kritéria opotřebení VB se odečítají hodnoty trvanlivosti a řezných rychlostí, které jsou souřadnicemi pro zlogaritmovaný graf, jehož výsledkem je přímka odpovídající hodnotě kritéria VB. [19]



Obr. 4.1.2. Zlogaritmovaný graf závislosti T - v_c . [19]

V praxi se využívá rozšířený vztah pro T - v_c závislost. Je to dáno tím, že v předchozím případě je dost limitních předpokladů (V_B , a_p , f_z jsou konstantní). [19]

e) Rozšířený vztah T - v_c závislosti (Taylorův vztah):

$$v_{cT} = \frac{C_{vT}}{a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}}$$

v_{cT} – řezná rychlost při konstantní trvanlivosti ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)

c_{vT} – konstanta

x_v – exponent vyjadřující vliv hloubky řezu

y_v – exponent vyjadřující vliv posuvu na otáčku [19]

f) Rozšířený vztah T - v_c závislosti (Taylorův vztah):

$$v_c = \frac{c_v}{T^{\frac{1}{m}} \cdot a_p^{x_v} \cdot f^{y_v}}$$

c_v – konstanta [19]

Řezivost řezného nástroje je definována jako vlastnost řezného nástroje efektivně odebírat třísku z obráběného materiálu. Je odvislá od fyzikálních a mechanických vlastností řezného nástroje a obráběného materiálu, metody obrábění, geometrie nástroje, řezných podmínek. [19]

4.2 Současný stav testování trvanlivosti nástrojů při obrábění grafitových materiálů

I) *Obrábění grafitových/epoxidových kompozitních materiálů nástroji s povlakem polykrystalického diamantu.*

Tato studie se zabývala testováním řezných nástrojů s povlakem z polykrystalického diamantu. Řezný nástroj byl testován v několika úrovních, každá z úrovní se lišila řeznými podmínkami. Po každé úrovni následovala kontrola řezného nástroje.

Během testování bylo zjištěno, že během obrábění dochází k tvorbě mikrotrhlin a opotřebenosti řezné hrany nástroje. Toto opotřebení bylo závislé na řezných podmínkách v daných úrovních testu a také na síle povlakové vrstvy (tato skutečnost hrála převážnou roli v opotřebenosti nástroje). Čím tedy byla povlaková vrstva silnější a kvalitnější, tím se řezný nástroj méně opotřeboval a vydržel tak déle v řezu. Během testování se kontrolovala i kvalita obrobených ploch pomocí analýzy povrchů a drsnost obrobených ploch, pomocí elektronového mikroskopu. [20]

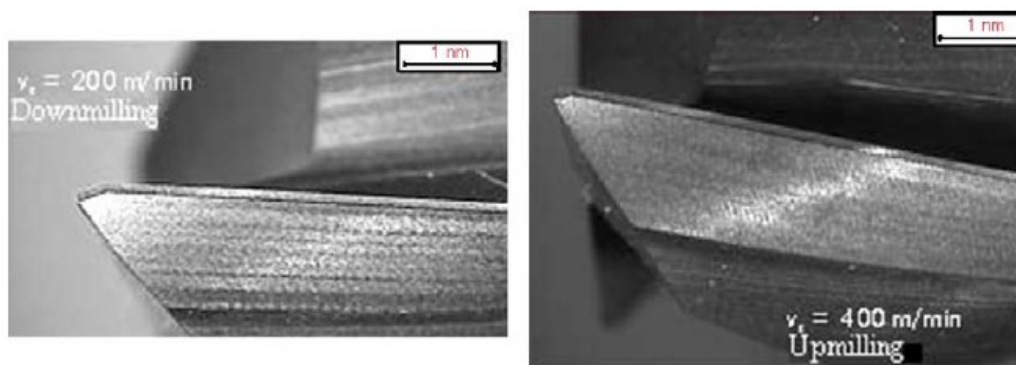
II) Vysokorychlostní frézování průmyslových elektrod pro EDM.

Tento test probíhal podle předpisu normy ISO 8688-2. Realizoval se pro dokončovací obrábění. Byla zvolena míra opotřebení $VB=0,1$ mm a test probíhal, z důvodu urychlení, ve třech časových intervalech, a to: 4. min, 8. min a 10. min.

Mezi uvedenými časovými intervaly se provádělo kontrolní měření míry opotřebení řezného nástroje. Materiál řezných nástrojů byl slinutý karbid (TiAlN) s povlakem z polykrystalického diamantu. Řezné parametry posuv na zub (f_z), radiální šířka řezu (a_e) a axiální šířka řezu (a_p) zůstaly konstantní. [20]

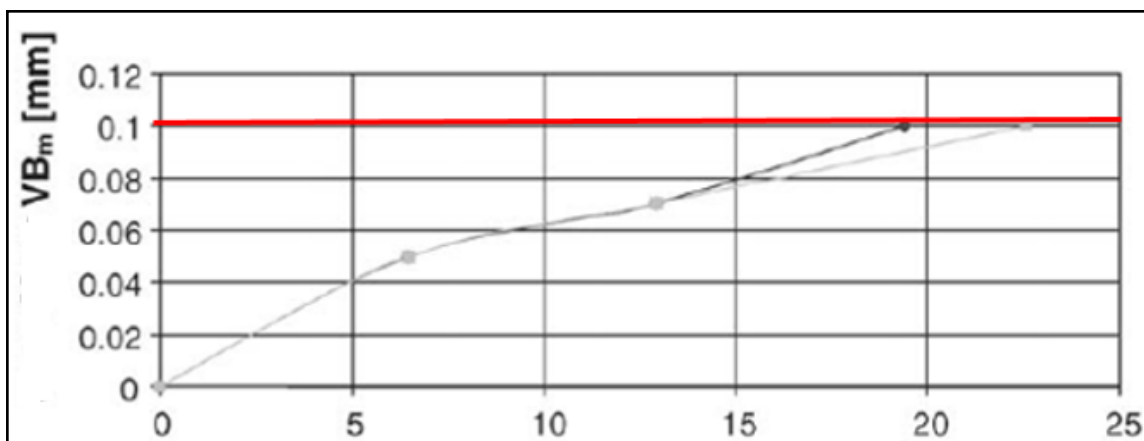
Cílem testu bylo zjištění, jakých opotřebení dosahuje nástroj při daných rychlostech obrábění. Během testu se zjistilo, že při nižší řezné rychlosti $v_c = 200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ dosáhl nástroj hodnoty stanovené míry opotřebení.

Naopak při vyšších řezných rychlostech např. $v_c = 400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ byl proces obrábění stabilní a míra opotřebení nástroje dosahovala hodnoty okolo 0,03 mm. [21]



Obr. 4.2.1. Opotřebení nástroje [21]

Pro větší rozsah testu se řezná rychlost zvedla až na $800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a po porovnání míry opotřebení s nástroji, které byly zatíženy nižší řeznou rychlostí, bylo zjištěno, že nástroj dosáhl hodnoty stanovené míry opotřebení. Tím se také potvrdilo, že s rostoucí řeznou rychlostí roste i opotřebení nástroje. [21]

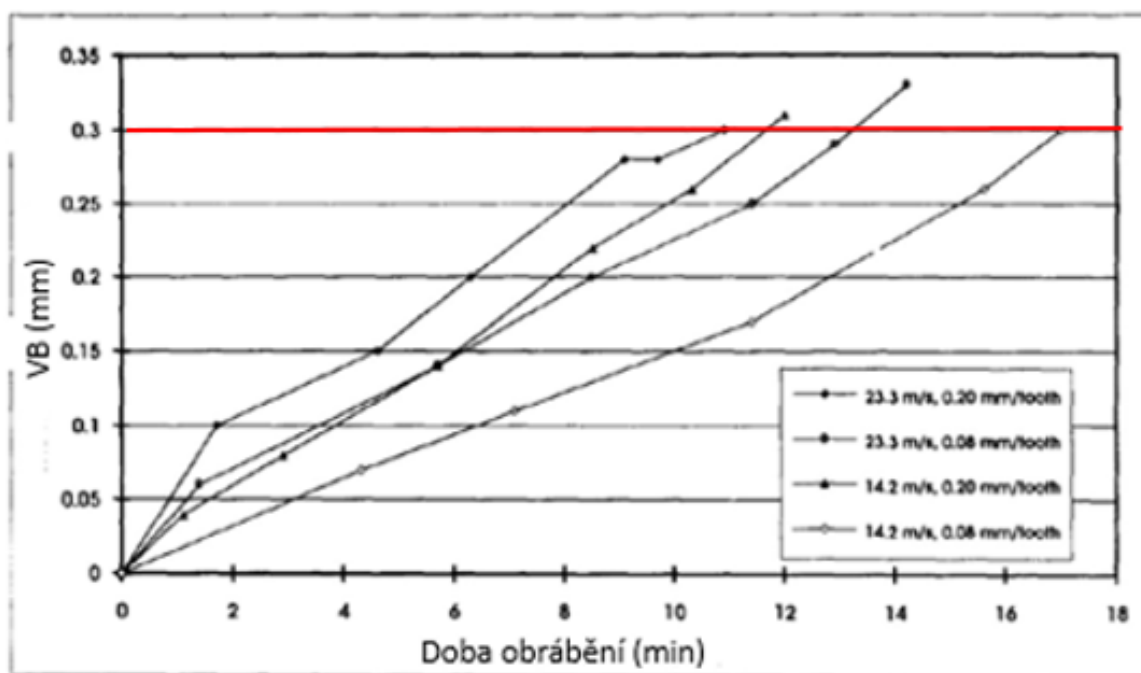
Obr. 4.2.2. Závislost opotřebení nástroje v čase pro $v_c = 800 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. [21]

III) Vysokorychlostní frézování nekonvenčních materiálů-grafitu.

Test probíhal obdobně jako v předchozím případě. Byl zaměřen na opotřebení nástroje v podmínkách vysokorychlostního obrábění. Kritérium míry opotřebení nástroje $VB=0,3 \text{ mm}$. [22]

Řezná rychlost V_c [m/s] (m/min)				
	Posuv na zub ($f_z = 0,08 \text{ mm}$)		Posuv na zub ($f_z = 0,2 \text{ mm}$)	
	T [min]	V [cm^3]	T [min]	V [cm^3]
14 (850)	7.4	1350	12.3	2390
23 (1400)	12.3	960	9.9	1930

Obr. 4.2.3. Parametry obrábění [22]



Obr. 4.2.4. Závislost opotřebení nástroje v čase [22]

4.3 Testování trvanlivosti VBD pro frézování grafitu

Tato práce, jak již bylo popsáno, se zabývá testováním trvanlivosti vyměnitelných břitových destiček pro frézování grafitu. Test spočívá v porovnání čtyř typů vyměnitelných břitových destiček, kdy základním materiálem těchto destiček je slinutý karbid. Destičky od sebe odlišuje ochranný povlak, tvořený polykrystalickým diamantem (rozdílnost např. v chemickém složení, velikosti zrn, aj.).

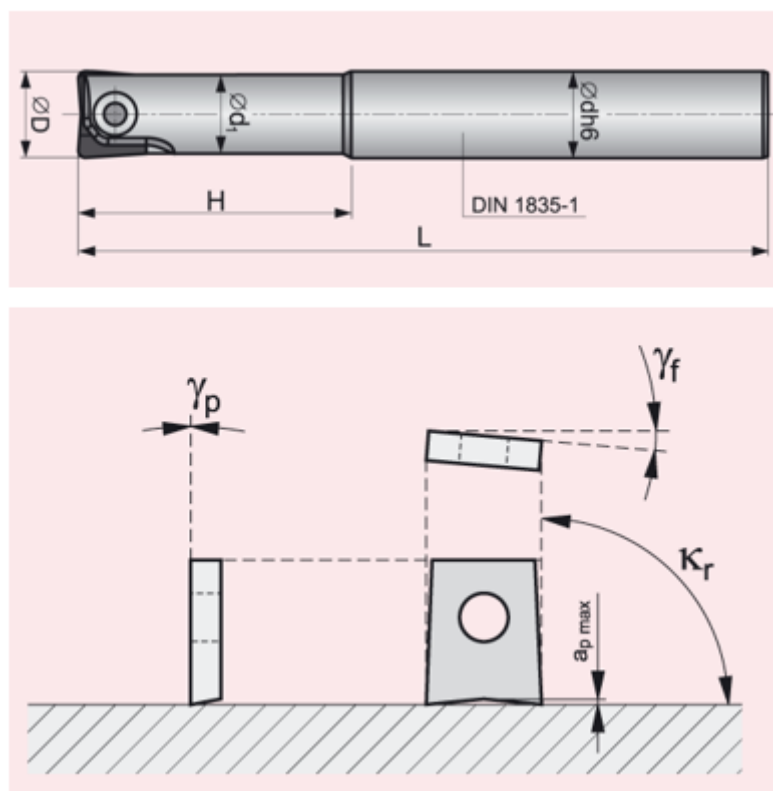
Cílem této práce je zjistit, který z ochranných povlaků propůjčuje vyměnitelné břitové destičce lepší vlastnosti, tedy porovnání trvanlivosti bříty v souladu s normou ISO 3685.

Průběh testu (zkouška trvanlivosti), bude probíhat na vertikálním CNC frézovacím centru (MAS 750 Sprint, v úpravě pro frézování grafitu) a bude aplikován pro hrubovací frézování grafitu (R8650).

Použitá fréza je tvořena ocelovým tělem, s lůžkem pro vyměnitelnou břitovou destičku (dále jen VBD), která je k tělu frézy fixována šroubkem. Označení této frézy je 10K2R060A-SRC10-A (dodavatel Pramet Tools, s.r.o.), což je označení pro frézu toroidní (rádiusovou) s VBD o Ø10 mm.

Lůžko ocelového těla frézy umožňuje ustavení VBD v těchto úhlech:

$\kappa_r = 90^\circ$, $\gamma_p = 0^\circ$, $\gamma_f = -7^\circ \div -14^\circ$. Testované VBD mají rohový rádius o velikosti R1.



Obr. 4.3.1. Fréza 10K2R060A-SRC10-A [23]

Fréza je upnuta do vřetene stroje pomocí kleštinového upínače, který je tvořen utahovací maticí a přesnou svěrací kleštinou.

4.4 Průběh testu

Zkouška trvanlivosti probíhala za předem stanovených řezných podmínek (viz. Tabulka č. 1.).

Tab. 1. Zvolené řezné podmínky pro zkoušku trvanlivosti břitu VBD

v_c [m.min ⁻¹]	f [mm]	a_p [mm]	a_e [mm]	Pozn.
400	0,1	0,5	4	bez chlazení

K přerušování frézování a kontrolnímu měření docházelo po: 4. min, 8. min a 14. min.

Měřené parametry:

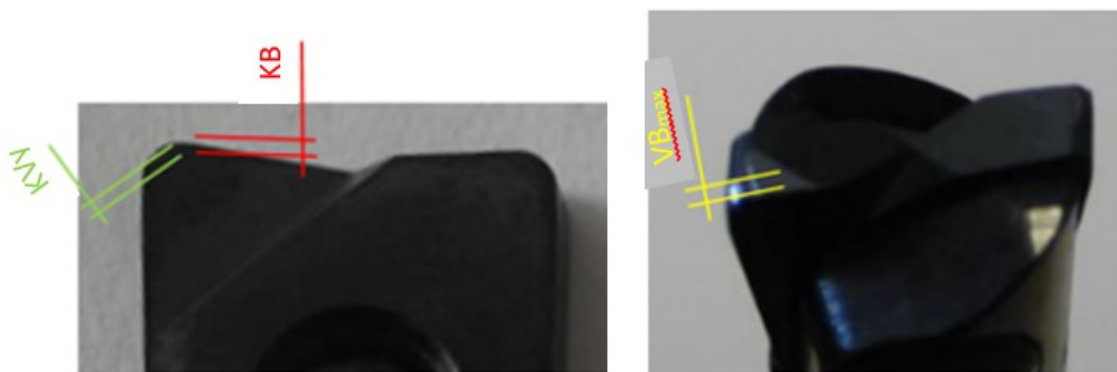
- Plocha čela A_γ

KVy - radiální opotřebení špičky [mm]

KB - šířka žlábků – vzdálenost vzdálenější hrany žlábků od ostří [mm]

- Plocha hřbetu A_α

VB_{max} - maximální opotřebení hřbetu [mm]



Obr. 4.4.1. Měřené parametry

Jelikož byl test prováděn v reálných podmínkách, následoval zátěžový dlouhodobý test, který byl ukončen po dosažení stanoveného kritéria opotřebení hřbetu $VB=0,3$ mm (během této části testu obsluha stroje prováděla kontrolu vždy po hodině řezu).

Jak již bylo popsáno výše, k testu byly k dispozici čtyři typy vyměnitelných břitových destiček pod kódovým označení:

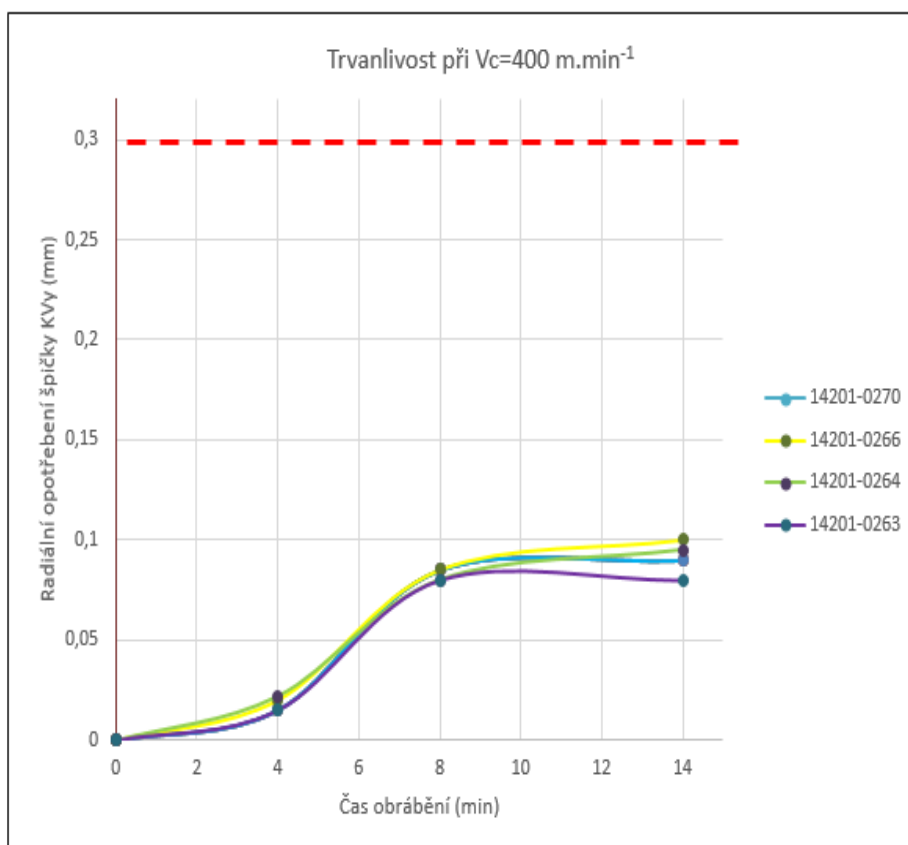
- 1) 14201-0270
- 2) 14201-0266
- 3) 14201-0264
- 4) 14201-0263

Vyhodnocení opotřebení plochy čela A_γ

- a) K_{Vy} - radiální opotřebení špičky [mm].

Tab. 2. Naměřené hodnoty radiálního opotřebení špičky K_{Vy}, pro dané VBD

Čas obrábění	4 min	8 min	14 min
14201-0270	0,015 mm	0,085 mm	0,09 mm
14201-0266	0,02 mm	0,085 mm	0,1 mm
14201-0264	0,022 mm	0,08 mm	0,095 mm
14201-0263	0,015 mm	0,08 mm	0,08 mm



Obr. 4.4.2. Opotřebení VBD - KVy

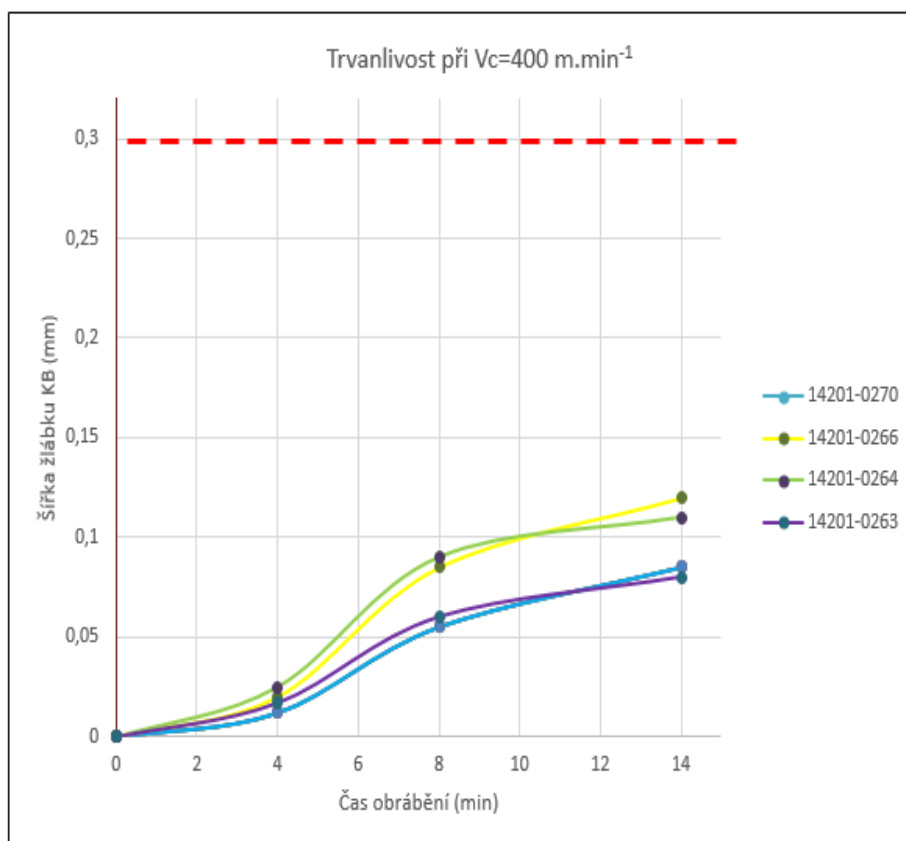


Obr. 4.4.3. Opotřebení VBD - KVy- 14201-0266

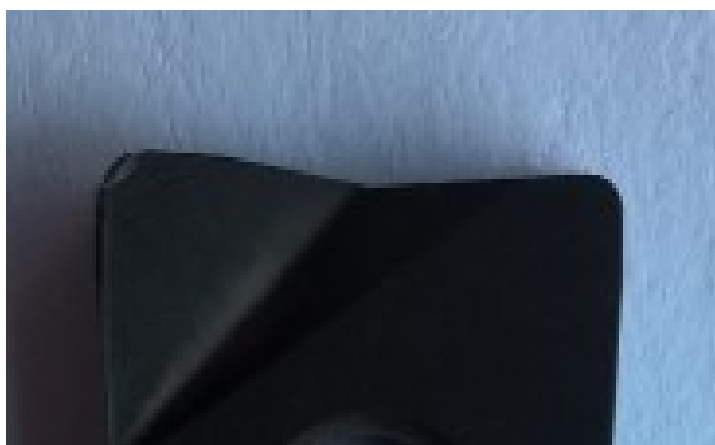
- b) KB – šířka žlábků - vzdálenost vzdálenější hrany žlábků od ostří [mm].

Tab. 3. Naměřené hodnoty šířky žlábků KB, pro dané VBD

Čas obrábění	4 min	8 min	14 min
14201-0270	0,012 mm	0,055 mm	0,085 mm
14201-0266	0,02 mm	0,085 mm	0,12 mm
14201-0264	0,025 mm	0,09 mm	0,11 mm
14201-0263	0,017 mm	0,06 mm	0,08 mm



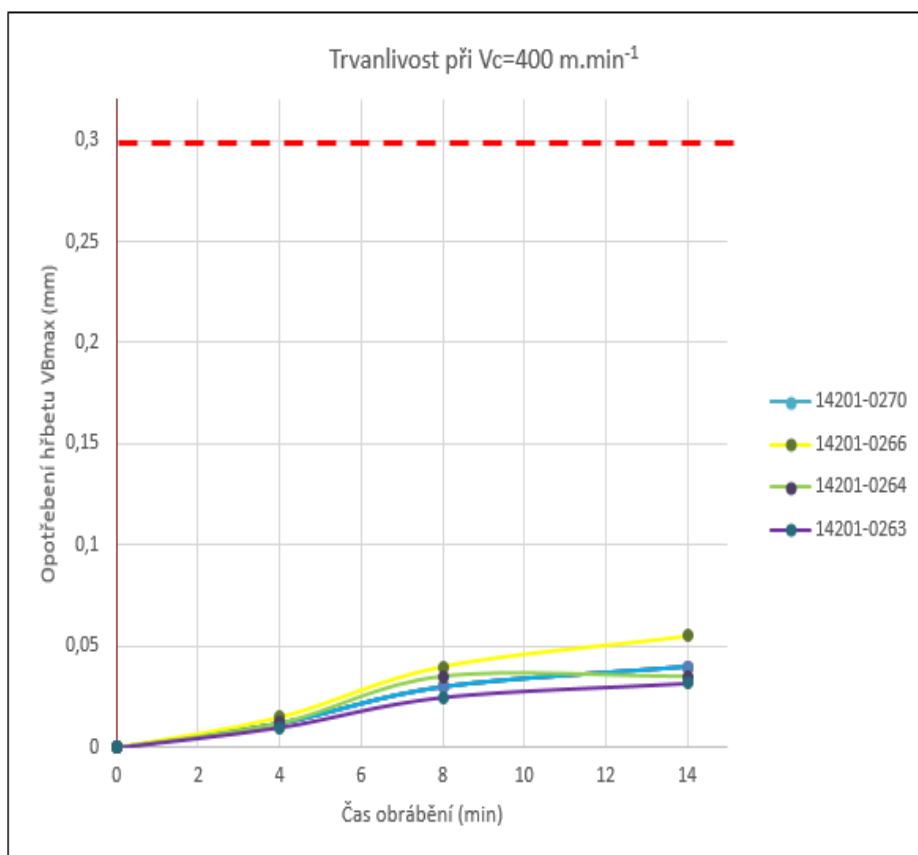
Obr. 4.4.4. Opotřebení VBD – KB



Obr. 4.4.5. Opotřebení VBD – KB - 14201-0266

Vyhodnocení opotřebení plochy hřbetu Aac) VB_{\max} - maximální opotřebení hřbetu [mm].Tab. 4. Naměřené hodnoty maximálního opotřebení hřbetu VB_{\max} , pro dané VBD

Čas obrábění	4 min	8 min	14 min
14201-0270	0,012 mm	0,03 mm	0,04 mm
14201-0266	0,015 mm	0,04 mm	0,055 mm
14201-0264	0,012 mm	0,035 mm	0,035 mm
14201-0263	0,01 mm	0,025 mm	0,032 mm

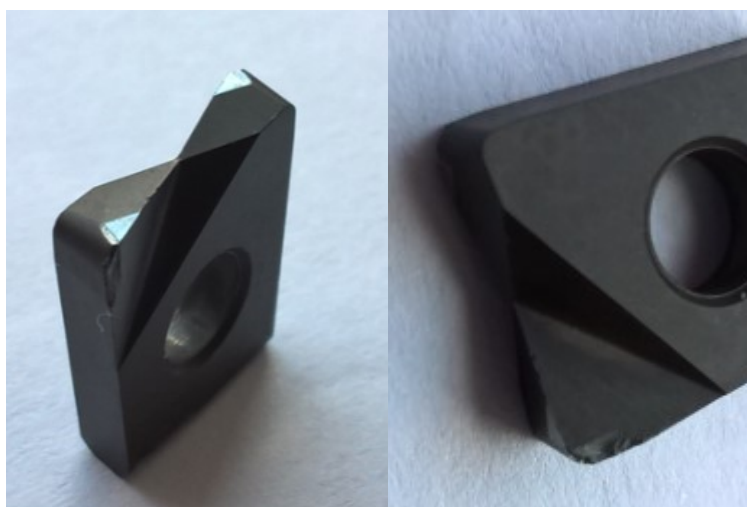
Obr. 4.4.6. Opotřebení VBD - VB_{\max} Obr. 4.4.7. Opotřebení VBD - VB_{\max} - 14201-0266

Vyhodnocení dlouhodobého testu

d) Dosažení stanovené hodnoty $VB_{\max} = 0,3 \text{ mm}$ a ukončení testu.

Tab. 5. Dosažení stanovené hodnoty VB_{\max} , pro dané VBD

VBD	Čas obrábění [h]
14201-0270	36,5
14201-0266	16
14201-0264	23,5
14201-0263	38,5



Obr. 4.4.8. Dosažení VB_{\max} - 14201-0266

4.5 Celkové vyhodnocení testu

Z průběhu testu a celkového množství sesbíraných dat je zřejmé, že vlivem tvrdosti obráběného materiálu (tedy grafitu R8650) je řezný klín vyměnitelné břitové destičky (dále jen VBD) vystavován abrazivnímu opotřebení. Tuto skutečnost bylo možné nejlépe vyzorovat u VBD typu 14201-0266, která v testu vyšla nejhůře. V prvních minutách obrábění docházelo k postupnému narušování ochranného povlaku na čele i hřbetu dané VBD. S postupem času (během dlouhodobé části testu) se rychlost opotřebení více projevovala na hřbetu, kde bylo patrné i postupné odbrušování základního materiálu VBD. Na břitu nástroje docházelo z počátku ke vzniku drobných výbrusů, které s postupem času nabíraly na intenzitě a velikosti. Test byl zastaven obsluhou ve chvíli, kdy se razantně změnila charakteristika průběhu obrábění. Po následném kontrolním měření bylo zjištěno, že u tohoto typu VBD (14201-0266) došlo k několikanásobnému překročení stanovené hodnoty VB_{\max} a dosažení hranice životnosti.

Tabulka celkového hodnocení (Tab. 6.), je sestavena dle výsledků testů od nejlépe hodnocených po nejhůře hodnocené VBD.

Známkování je obdobné, jako ve škole:

1. Výborně
2. Chvalitebně
3. Dobře
4. Dostatečně
5. Nedostatečně

Tab. 6. Celkové vyhodnocení testovaných VBD

VBD	Známka
14201-0263	3
14201-0270	3
14201-0264	4
14201-0266	5

Na známku s hodnotou 1, nedosahoval ani jeden typ z testovaných VBD, neboť pro srovnání byla k dispozici VBD (typ CD01) od konkurenční firmy (LMT FETTE, s.r.o.), která v dlouhodobém zátěžovém testu vydržela v řezu 55 h.

Z ekonomického hlediska je zřejmé, že pro vykonání alespoň stejného nebo většího objemu práce, který vykonala VBD typu CD01, je zapotřebí pořídit 2 kusy VBD typu 14201-0263 (tento typ VBD byl vybrán na základě dosažení nejlepšího hodnocení v testu). Ekonomickou výhodnost takové volby, je potřeba posoudit dle cenové politiky jmenovaných dodavatelů VBD.

Závěr

Tato práce byla zaměřena na testování trvanlivosti čtyř typů vyměnitelných břitových destiček, které se od sebe liší složením ochranné povlakové vrstvy. Během testu, který s drobnými přestávkami trval dva týdny, se sesbíralo mnoho cenných dat a informací, které zadavateli testu (firmě Pramet Tools s.r.o.) posloužil k posouzení, zda se vydat cestou výroby a distribuce tohoto produktu.

Zadavatel si pro objektivní posouzení nechal tento test vypracovat nezávisle i v jiných podnicích se zjištěním, že bylo dosaženo obdobných výsledků.

Dle zjištěných informací, se zadavatel (firma Pramet Tools s.r.o.) nechystá tento produkt uvést na trh. Důvodem je vysoká zmetkovitost při nanášení ochranné povlakové vrstvy na matrici ze slinutého karbidu vyměnitelné břitové destičky.

Děkuji doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petřů, Ph.D., z katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie VŠB – TU Ostrava za cenné a podnětné rady a připomínky při vypracování diplomové práce.

Děkuji firmě S-KUNSTSTOFFTECHNIK s.r.o. Kravaře, za podporu při testování a zpracování diplomové práce.

Seznam použité literatury

- [1] MORGAN, Peter. *Carbon fibers and their composites*. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group, 2005. 1153 p. ISBN-10 0-8247-0983-9 ISBN-13 978-0-8247-0983-9.
- [2] LEGENDRE, André. *Uhlíkové materiály: Od černé keramiky k uhlíkovým vláknům*. Praha: Informatorium, 2001. 173 s. ISBN 80-86073-82-3 .
- [3] PIERSON, H.O. *Handbook of Carbon, Graphite, Diamond and Fullerenes: Properties, Processing and Applications*. Park Ridge NJ: Noyes Publications, 1993. 419 p. ISBN 0-8155-1339-9.
- [4] WIKIWAND [online]. [vid. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://www.wikiwand.com/>.
- [5] carbonsmay [online]. [vid. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://www.carbonsmay.cz/>.
- [6] diatec-pforzheim [online]. [vid. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://www.diatec-pforzheim.de/>.
- [7] achot [online]. [vid. 2017-08-03]. Dostupné z: <http://www.achot.cz/>.
- [8] PENTA Trading s.r.o [online]. [vid. 2017-28-03]. Dostupné z: <http://www.penta-edm.cz/>.
- [9] EROWA systém solutions [online]. [vid. 2017-29-03]. Dostupné z: <http://www.erowa.com>.
- [10] S-Kunststofftechnik s.r.o. Interní firemní zdroje.
- [11] LMT FETTE, s.r.o. [online]. [vid. 2017-30-03]. Dostupné z: <http://www.lmt-fette.cz/>
- [12] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů I. část*. VŠB-TU Ostrava: Ostrava 2008. 148 s. ISBN 978-80-248-1053-9.
- [13] PM-TECH s.r.o. [online]. [vid. 2017-01-04]. Dostupné z: http://www.pmtech.cz/D00100_pdf_katalogy/PMTECH_07_Zecha_21_katalog_mikro_frezy_grafit.pdf .
- [14] KARAS [online]. [vid. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.pasove-pily.eu/pilous-pasova-pila-na-kov-arg-300-plus-26939.html>.
- [15] i-bazar [online]. [vid. 2017-01-04]. Dostupné z: <http://www.i-bazar.cz>.
- [16] WANG, L and kolektive. [online]. [vid. 2017-01-04]. *Cutting Performances of Boron Doped Diamond-Coated Milling Tools in Machining Graphite*. Dostupné z: https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=15&SID=P1OkW4Ww6kGmJHzbvQM&page=2&doc=11.
- [17] SADÍLEK, Marek. *Nekonvenční metody obrábění I*. VŠB-TU Ostrava: Ostrava 2016. 106 s. ISBN 978-80-248-3943-1.
- [18] BARCAL, J. *Nekonvenční metody obrábění*. Vydavatelství ČVUT , Praha 1989. 122s.

- [19] BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana; PETŘKOVSKÁ, Lenka.
Technologie II – 2. díl. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1822-1.
- [20] RAMULU, M; FARIDNIA, M; GARBINI, J. L.; JORGENSEN, J. E. *Machining of Graphite/Epoxy Composite Materials With Polycrystalline Diamond (PCD) Tools*.
Department of Mechanical Engineering, University of Washington, Seattle, WA
98195.
- [21] SCHROETER, Rolf Bertrand; KRATOCVIL, Rafael; JEFERSON DE OLIVIERA, Gomes. *High-speed finishing milling of industrial graphite electrodes*.
Journal of Materials Processing Technology 179 (2006) 128-132.
- [22] NIEMINEN, I; PARO, J; KAUPPINEN, V. *High-speed milling of advanced materials*.
Journal of Materials Processing Technology 56 (1996) 24-26.
- [23] *Pramet Tools, s.r.o.* [online]. [vid. 2017-26-04]. Dostupné z: <http://ecat.pramet.com>.
- [24] COOK, M, W; BOOSOM, P, K. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*. (2000) 147-152.
- [25] DING, X; LIU, X, D; LIEW, W, Y, H. *Evaluation of machining performance of MMC with PCBN and PCD tools*. (2005) 1225-1234.
- [26] *NORD CZ s.r.o.* [online]. [vid. 2017-10-05]. Dostupné z:
<http://www.toolscomp.cz/technologie/edm-elektrojiskrove-obrabeni>.